



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

NUMERICKÁ PODPORA PRO ŠTÍPACÍ TEST NA TRÁMOVÉM TĚLESE

NUMERICAL SUPPORT FOR WEDGE SPLITTING TEST ON NON-TRADITIONAL GEOMETRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tereza Juhászová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. STANISLAV SEITL, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Tereza Juhászová
Název	Numerická podpora pro štípací test na trémovém tělese
Vedoucí práce	doc. Ing. Stanislav Seitzl, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	5. 6. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] S. Seitzl, V. Veselý, L. Řoutil, Two-parameter fracture mechanical analysis of a near-crack-tip stress field in wedge splitting test specimens, *Computers & Structures*, 89 (21–22) (2011) 1852-1858
- [2] S. Seitzl, P. Miarka, I. Merta, Z. Keršner. Numerical Stress Analysis of the Biaxial Tension-Compression Wedge-Splitting Test in Vicinity of the Crack Tip. In *Local Mechanical Properties XIII. Key Engineering Materials* (web). Trans Tech Publications, Switzerland, 784 (2018) 85-90
- [3] E. Brühwiler, F. H. Wittmann, The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics test. *Engineering Fracture Mechanics*, 35, (1990) 117–125.
- [4] G.V. Guinea, M. Elices, J. Planas, Stress intensity factors for wedge-splitting geometry. *International Journal of Fracture*, 81, (1996) 113–124.
- [5] Z. Knésl, K. Bednář, J.C. Radon, Influence of T-stress on the rate of propagation of fatigue crack. *Physical Mesomechanics*, (2000) 5–9.
- [6] P. S. Leevvers, J. C. Radon, Inherent stress biaxiality in various fracture specimen geometries. *International Journal of Fracture*, 19, (1983) 311–325.
- [7] N.P. O'Dowd, C.F. Shih, Two-parameter fracture mechanics: theory and Applications. *Fracture Mechanics*, 24, (1994) 21–47.
- [8] J. Sobek, Proper Nominal Stress Distribution Subjected to Combination of Wedge-Splitting and Bended Geometry Tests, *Procedia Engineering*, 190, (2017) 406-413
- [9] J.F. Guan, X.Z. Hu, C.P. Xie, Q.B. Li, Z.M. Wu, Wedge-splitting tests for tensile strength and fracture toughness of concrete, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 93 (2018) 263-275
- [10] ANSYS –manuál www.ansys.com

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Bakalářská práce bude vypracována v úzké spolupráci s vedoucím specialistou Ing. Petrem Miarkou.

- Vypracujte stručný přehled o lineární lomové mechanice a jejím rozšířením na dvouparametrovou lomovou mechaniku a popište výpočetní techniky používané v dostupných softwarech.
- Vypracujte podrobné numerické modely testu v zadané zkušební konfiguraci.
- S odladěnými numerickými modely proveďte parametrické studie vlivu okrajových podmínek na lomově mechanické parametry.
- Na základě rozboru výsledků parametrické studie vytvořte pomůcky pro vyhodnocování reálných experimentálních testů ve vybrané zkušební konfiguraci.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na numerickou podporu netradičního štípacího testu. Numerická analýza je provedena v programu ANSYS pro tělesa s různými vstupními parametry a vyhodnocení jejich chování při štípacím testu. Sledované jsou výsledné hodnoty parametrů charakteristických pro výpočty lomové mechaniky; *faktor intenzity napětí* a *T-napětí* a jejich funkcích v závislosti na délce sledované trhliny, jejichž průběh je graficky znázorněn.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lomová mechanika, netradiční štípací test, ANSYS, faktor intenzity napětí, T-napětí

ABSTRACT

Bachelor thesis is focused on numerical support of wedge splitting test with non-traditional geometry. Numerical analysis takes place in program Ansys, defining behavior of models with modified entry parameters. Attention is focused on values of parameters characteristic for fracture mechanics; *stress intensity factor* and *T-stress* and functions describing their relationship to length of crack, evaluation of which is graphically illustrated.

KEYWORDS

Fracture mechanics, non-traditional wedge splitting test, ANSYS, stress intensity factor, T-stress

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Tereza Juhászová *Numerická podpora pro štípací test na trémovém tělese*. Brno, 2020. 108 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce doc. Ing. Stanislav Seitzl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Numerická podpora pro štípací test na trémovém tělese* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 5. 6. 2020

Tereza Juhászová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Numerická podpora pro štípací test na trémovém tělese* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 5. 6. 2020

Tereza Juhászová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě vyjadřuji velké poděkování vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Stanislavu Seitlovi, Ph.D a odbornému specialistovi Ing. Petrovi Miarkovi za veškerou pomoc s řešením bakalářské práce a problémů vzniklých v průběhu, za jejich trpělivost a vstřícný přístup. Dále chci poděkovat mojí rodině a nejbližším za podporu v celém průběhu studia.

Práce vznikla v rámci řešení projektu 20-00761S podpořený GAČR a projektu 8J20AT013 podpořený MŠMT.

Obsah

Úvod.....	11
1. Lomová mechanika	12
1.1. Faktor intenzity napětí	12
1.2. T-napětí.....	13
2. Lomové zkoušky a zkušební tělesa	14
2.1. Tříbodový ohyb.....	14
2.1.1. Geometrie a výpočet parametrů	15
2.2. Štípací test	16
2.2.1. Geometrie a výpočet parametrů	17
2.3 Netradiční štípací test	18
2.3.1 Geometrie a výpočet parametrů	18
3. Výpočetní techniky lomově-mechanických parametrů používané v softwarech...	19
3.1. Metoda extrapolace posunů	19
3.2. Integrační metoda interakce	20
4. Výpočtové modelování	21
4.1. Materiálové parametry	21
4.2. Geometrické parametry	23
4.3. Příkaz CINT a KCALC.....	23
5. Tvorba modelů zkoušek použitých pro vyhodnocení parametrů.....	24
5.1. Tříbodový ohyb.....	24
5.2. Tahová zkouška na tělese s oboustrannou trhlinou.....	26
5.3. Štípací test	28
5.4. Netradiční štípací test.....	30
6. Výsledky a vyhodnocení.....	33
6.1. Tříbodový ohyb.....	33
6.2. Tahová zkouška na tělese s oboustrannou trhlinou.....	36
6.3. Štípací test	39
6.4. Netradiční štípací test.....	42
6.4.1. Současný růst délek trhlín.....	42
Parametry B_1	42

Parametry B_2	45
Rovnající se hodnoty parametrů.....	47
6.4.2. Růst trhliny 1 za konstantní délky trhliny 2	48
Parametry B_1	48
Parametry B_2	52
Rovnající se hodnoty parametrů.....	55
6.4.3. Růst trhliny 2 za konstantní délky trhliny 1	57
Parametry B_1	57
Parametry B_2	61
Rovnající se hodnoty parametrů.....	64
7. Doporučení pro experimentální provedení testu.....	66
7.1. Zkušební těleso (Reálný model)	66
7.1.1. Geometrie a výpočet parametrů	66
7.1.2. Numerický model.....	67
7.1.3. Výsledky a diskuze	68
Současný růst délky trhlín.....	68
Růst trhliny 1 za konstantní délky trhliny 2	72
Růst trhliny 2 za konstantní délky trhliny 1	76
Rovnající se hodnoty parametrů.....	80
Deformace tělesa	81
Pole napětí	82
8. Závěr	84
Seznam zdrojů a použité literatury.....	85
Příloha 1: Výsledky modelování seřazeny do přehledných tabulek	87
Zjednodušený model	88
Růst trhliny 1 za konstantních délek trhliny 2- parametry B_1	88
Růst trhliny 1 za konstantních délek trhliny 2- parametry B_2	90
Růst trhliny 2 za konstantních délek trhliny 1- parametry B_1	92
Růst trhliny 2 za konstantních délek trhliny 1- parametry B_2	94
Reálný model	96
Růst trhliny 1 za konstantních délek trhliny 2	96

Růst trhliny 2 za konstantních délek trhliny 1	98
Seznam obrázků	101
Seznam tabulek.....	105

Úvod

Trhliny, které jsou hlavním předmětem zkoumání lomové mechaniky, jsou součástí téměř všech těles a materiálů a při navrhování je nezbytné brát v potaz jejich účinek na konstrukci. V současnosti se ve dvouparametrové lomové mechanice na popis chování trhlin používají hlavně parametry zvané *faktor intenzity napětí* a *T-napětí*. Hodnoty zmíněných veličin přímo souvisí s napětím působícím ve vrcholu neboli u kořene trhliny a rozhodují, zdali má trhlina vhodné podmínky pro růst.

Pro laboratorní zkoušky se od začátku 90.-tých let začal používat štípací test neboli WST (z anglického wedge splitting test), který se vzhledem na množství výhod prokázal jako mimořádně vhodný na výzkum chování tělesa s trhlinou.

Předmětem bakalářské práce je parametrická studie chování tělesa s netradiční geometrií při štípacím testu. Na rozdíl od výchozího testu jsou na betonovém kvádru stálé výšky s variovaným delším rozměrem, a tedy i rozpětím podpor, v počátku zkonstruované dvě trhliny. Demonstované těleso je modelované pomocí programu Ansys mechanical při různých situacích možného růstu jedné nebo obou trhlin. Dosažené výsledky jsou následně graficky zpracované a slovně popsány. Nakonec je u jednotlivých možností hledán případ, kdy dojde k největšímu přiblížení faktorů intenzity napětí jednotlivých trhlin.

1. Lomová mechanika

Lomová mechanika je oblast aplikované mechaniky zabývající se chováním tělesa s trhlinou. Trhliny jsou častými součásti tělesa, které vznikají či už během výroby nebo jako důsledek prvotního zatížení. Příznivé podmínky vzniku můžou vytvářet také opakované namáhání a povětrnostní podmínky. Pokud budeme uvažovat s materiálem homogenním, izotropním a s předpokladem lineární závislosti napětí a přetvoření, můžeme vycházet z poznatků lineárně elastické lomové mechaniky [19].

Obecně se lomová mechanika zabývá trhlínami srovnatelnými s rozměry tělesa a jejími vlivy na konstrukci, zejména na součásti konstrukcí, tedy matematickou závislostí mezi délkou trhliny a únosností materiálu. Předmětem zkoumání je tedy matematické vyjádření vlivu narůstající diskontinuity materiálu. Předpoklady teorie se odvíjejí od teorií porušení křehkým lomem, což prezentuje růst trhliny při statickém zatížení, zpravidla pod mezí kluzu. Zjednodušeně je možné napsat, že pokud napětí koncentrované ve vrcholu trhliny dosáhne hodnoty lomové houževnatosti, což je hodnota odolnosti materiálu vůči křehkému lomu, dojde k porušení vazeb v tělese a nastává růst trhliny. Dále musí být přítomné dostatečné množství energie, aby proces růstu trhliny mohl pokračovat. Metoda popisu napětí dvouparametrové lomové mechaniky vychází ze specifikování faktoru intenzity napětí K a T -napětí [1].

1.1. Faktor intenzity napětí

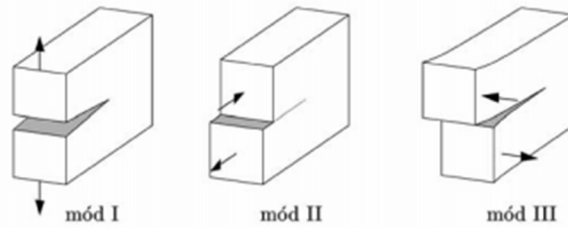
Faktor intenzity napětí, značený K , je v dnešní době nejpoužívanější parametr v lomové mechanice. Faktor intenzity napětí popisuje stav napjatosti ve vrcholu trhliny, souvisí s mírou růstu trhliny a je používán k popsání kritérií selhání únosnosti materiálu v její důsledku. Poznáme tři možné způsoby šíření se trhliny v tělese a vzhledem k tomu používané faktory intenzity napětí K_I , K_{II} a K_{III} [19].

Možnosti pohybu vrcholu v trhlíně nám tedy nabízejí tři módy:

Mód I – otevírací mód, s kterým se pracuje nejčastěji, protože většina trhlín má tendenci šířit se tímhle módem. V tomhle případě jsou tahová napětí kolmá k rovině trhliny, čehož následkem se povrchy trhliny pohybují přímo od sebe;

Mód II – rovinný smykový mód – smykové napětí zapříčiňují pohyb trhliny v její rovině kolmo k jejímu čelu;

Mód III – kolmý smykový mód – smyková napětí rovněž způsobují pohyb povrchů v její rovině, avšak rovnoběžně k čelu trhliny.



Obrázek 1: Módy zatížení tělesa s trhlinou [2]

Hodnoty napětí popisující stav v rovině v okolí vrcholu trhliny lze obecně v závislosti na faktoru intenzity napětí pro mód I zapsat jako:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] + T, \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right], \quad (2)$$

$$\tau_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right], \quad (3)$$

kde θ a r představují polární souřadnice a x a y kartézské souřadnice, oba systémy mají počátek ve vrcholu trhliny. K_I je hodnota součinitele intenzity napětí pro mód I a T hodnota *T-napětí* [2].

Hodnoty faktoru intenzity napětí pro nejčastější mód I mohou dosahovat pouze kladné hodnoty. Pokud je tomu naopak znamená to, že na trhlinu působí tlak, což způsobuje její uzavírání. V ostatních dvou případech mohou dosahovat hodnot jak kladných, tak záporných, v závislosti na konvenci [1].

1.2. T-napětí

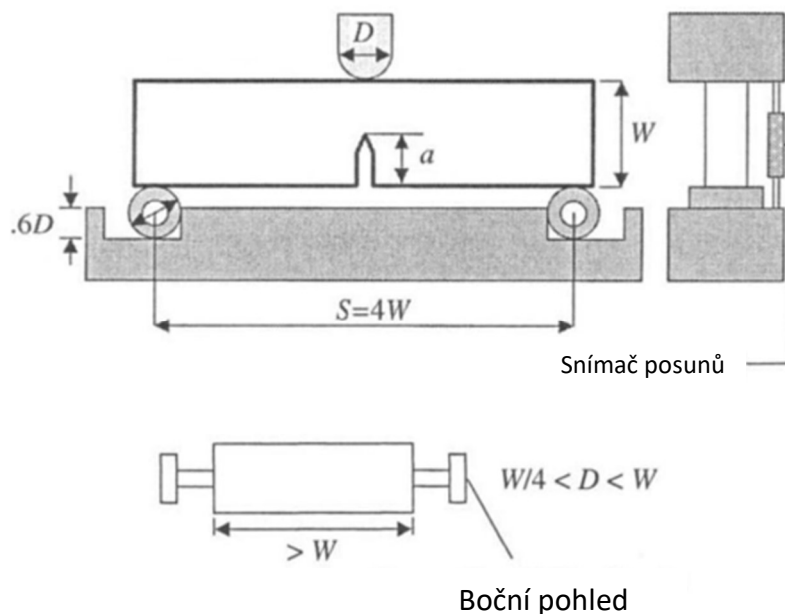
Při popsaní pole napětí tělesa s trhlinou pomocí napěťové řady neboli Williamsova rozvoje, souvisí první, singulární člen v módu I s faktorem intenzity napětí. Druhý, už nesignulární člen souvisí s tzv. *T-napětím*. *T – napětí* odpovídá napětí rovnoběžnému se směrem šíření trhliny a závisí na něm právě směrová stabilita trhliny. Pokud se má trhlina šířit stabilně v původním směru je potřebné *T – napětí* tlakové s malými náhodnými odchylkami. Naopak, tahové *T – napětí* způsobuje nestabilitu ve směru šíření a výrazně vyšší, i trvalé, následky i malých náhodných odchylek na cestu šíření trhliny [7].

2. Lomové zkoušky a zkušební tělesa

Pro zjišťování lomových parametrů na tělesech z kvazi-křehkých materiálů, jako jsou tělesa betonová, je časté používání zkušebních těles normovaných pro zkoušky pro prokázání jiných materiálových charakteristik, jako je tříbodový ohyb nebo zkouška pevnosti v tahu. Nejdůležitější je pro zjištění co nejpřesnějších hodnot faktoru intenzity napětí a taky jeho kritických hodnot zabezpečit směrovou stabilitu cesty růstu trhliny. Pro správné vyhodnocení je důležité rovněž naměření hodnot pod maximální únosností pro zaznamenání také tahového změkčení. Pro demonstraci rovinné deformace musí být zabezpečena dostatečná tloušťka tělesa ve směru normály ke kořenu trhliny. V neposlední řadě je důležité provedení dostatečné ostroty prvotního vrubu pro získání minima houževnatosti [1, 3].

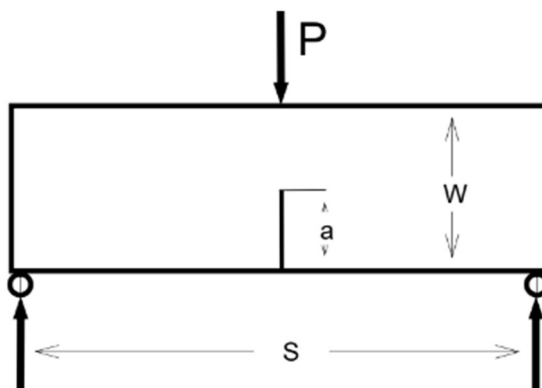
2.1. Tříbodový ohyb

Výroba vzorku pro použití v testu tříbodového ohybu s jednostranným vrubem je jednoduchá a nenákladná. Používá se stejné strojní zařízení jako při zkouškách pevnosti betonu v tahu za ohybu. Prosté kloubové podpory představují podpěrné válečky s průměrem o rozsahu $<W/2; W>$. Interval průměru je ideální pro minimální změnu vzdálenosti podpor, jejich volné otáčení během zatěžování redukuje vznik odporu třením. Vzdálenost podpor je určena jako čtyřnásobek šířky vzorku. Na líc trhliny je umístěn sponový snímač deformace neboli extensometr, který zaznamenává změnu délky trhliny a zkušební soustava zaznamená velikost působící síly [4].



Obrázek 2: Schéma soupravy používané pro test tříbodového ohybu s jednostranným vrubem [4]

2.1.1. Geometrie a výpočet parametrů



Obrázek 3: Statické schéma testu [6]

Působící napětí vyvozeno zatěžovací silou se dá vypočítat jako:

$$\sigma = \frac{3PS}{2W^2B}, \quad (4)$$

kde P představuje působící sílu, S rozpětí podpor, W výšku vzorku a B jeho tloušťku, která se při rovinné deformaci uvažuje jako 1. Faktor intenzity napětí lze pak v závislosti na působícím napětí vyjádřit jako:

$$K = B_1 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}, \quad (5)$$

kde a vyjadřuje délku trhliny a B_1 první koeficient Williamsova rozvoje a je obecně geometrickou funkcí závislou na poměru a/W a okrajových podmínkách. S dostatečnou přesností jí můžeme zjistit z tabulek, které jsou výsledky studií různých autorů zabývajících se touto problematikou. V práci se bude pracovat s hodnotami podle [6].

Pro T – napětí platí:

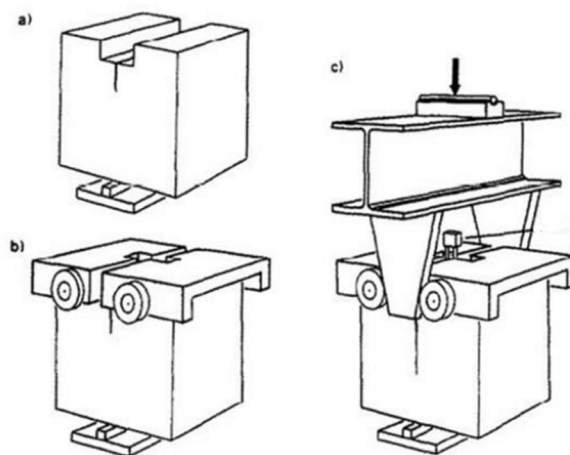
$$T = \frac{B_2 \cdot K_I}{\sqrt{\pi a}}, \quad (6)$$

kde B_2 vyjadřuje právě druhý člen tohoto rozvoje, který je rovněž možno získat z výsledků studií [6].

2.2. Štípací test

Pro nejpřímější vyhodnocení lomových parametrů by byla nejvhodnější zkouška jednoosým tahem s kontrolovaným přetvořením. Složitost však spočívá v poměrně malém přetvoření odpovídajícím mezi pevnosti v tahu a vysoké tuhosti betonových vzorků. Právě proto se v praxi více užívá zkoušek v tahu za ohybu. Klasické testy lomové houževnatosti, mezi které patří také třibodový ohyb však vyvozují poměrně velké nestálosti v průběhu testování a jsou proto nezbytně složité a komplikované zařízení na jejich kontrolu, které rozhodně nejsou klasickou součástí většiny laboratoří [8].

Řešení na tyto problémy poskytuje štípací test (WST), který se ukazuje jako metoda poskytování stabilního testování pro potřeby lomové mechaniky. Zkušební vzorky je možné jednoduše formovat jako prefabrikáty v tvaru kostky nebo je možné odebírat je už z již existujících konstrukcí jako jádrové vývrty v tvaru válce. Postup přípravy testu je znázorněn na obrázku 4. Po vytvoření nebo odebrání vzorku je do tělesa vyřezaná rýha a prvotní vrub(a). Těleso je umístěno na liniovou podporu a v jeho vrchní část jsou v dalším kroku symetricky umístěné dvě masivní zatěžovací zařízení, každé opatřeno pohyblivým válečkem(b). Mezi ně je pomocí ocelového válcovaného plnostěnného profilu zatlačován klín pro co nejpřesnější rozdělení tělesa pomocí trhliny přímo v ose symetrie (c).



Obrázek 4: Znázornění přípravy štípacího testu [8]

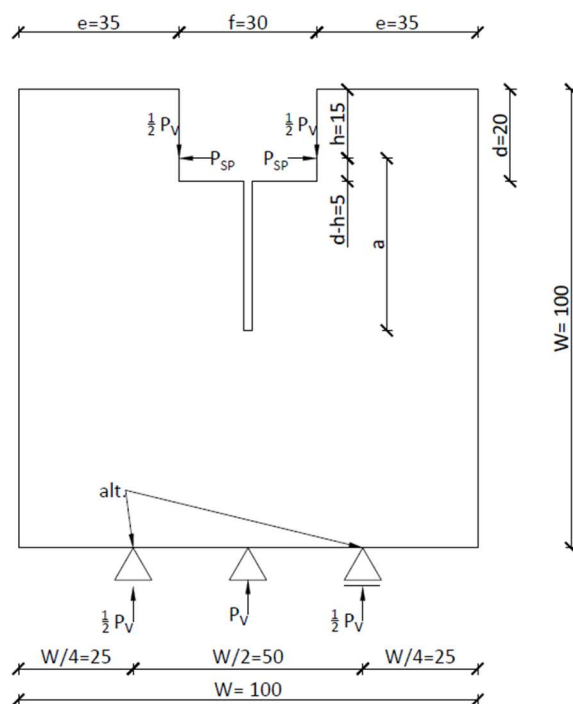
V průběhu testu působí na ocelový nosník vertikální síla, která se pod úhlem α_w klínu rozkládá na sílu vertikální a horizontální, která slouží k vyvození růstu trhliny. Její velikost můžeme určit jako:

$$P_v = P_{sp} \cdot 2 \cdot \tan(\alpha_w), \quad (7)$$

kde P_{sp} je horizontální složka působící síly. V úrovni působíšti této síly je navíc umístěn snímač zaznamenávající změnu délky trhliny [9].

V porovnání s třibodovým ohybem je výrazní výhodou zanedbatelnost vlastní tíhy vzhledem na energii trhliny, protože při 3BO dosahuje složka energie získaná tzv. mrtvou váhou až 60% celkové energie trhliny. Válečky navíc minimalizují třecí síly až na zanedbatelnou hodnotu [8,9].

2.2.1. Geometrie a výpočet parametrů



Obrázek 5: Geometrie štípacího testu [9] [10]

Štípací test znázorněný na obrázku 5 byl použitý jako výchozí geometrie pro analýzu netradičních těles, které jsou předmětem práce. Hodnoty koeficientů Williamsovy řady kalkulovány z dosažených hodnot K_I a T – *napětí* se obecně v závislosti na působící síle dají vyjádřit jako:

$$B_1 = \frac{K_I}{K_0}, \quad \text{kde } K_0 = \frac{P_{SP}}{B\sqrt{W}} \quad (8)$$

$$\text{a} \quad B_2 = \frac{T\sqrt{\pi a}}{K_I}, \quad (9)$$

kde B je tloušťka tělesa, W jeho šířka a a délka trhliny [11].

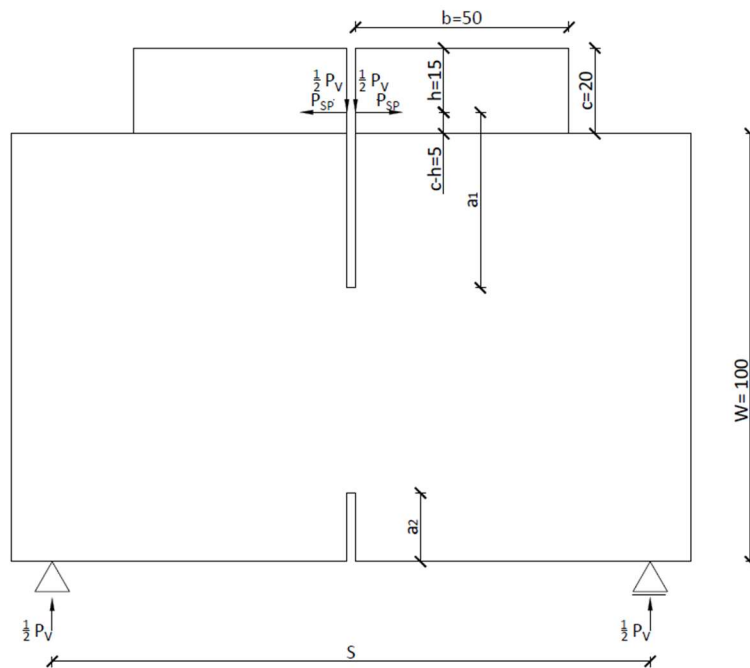
2.3 Netradiční štípací test

Hlavním předmětem studie bakalářské práce byl modifikovaný štípací test, jehož geometrie byla parametricky upravována. Model tělesa obsahuje v počátku dvě trhliny stejné délky, na spodním i vrchním okraji. Byly zhotoveny celkem čtyři varianty s různým poměrem rozpětím podpor k šířce tělesa. Stejně jako u výchozí varianty se síla působící přes klín rozkládá do vodorovného a svislého směru. Pro svislou složku platí vztah:

$$P_v = P_{sp} \cdot 2 \cdot \tan(\alpha_w) . \quad (10)$$

Těleso bylo modelováno jako kvádr stálé výšky W s příložkami, obdobně jako v [15], ve vrchní části, v kterých bylo umístěno působíště zatížení. Studie pracuje s lomově-mechanickými parametry K_I a T -napětí, v závislosti na poměru a/W , tedy délce trhliny k šířce tělesa. Délka trhliny 1, tedy trhliny v horní části je uvažována od působíště zatížení ke kořenu, délka trhliny 2 od kořene k spodnímu okraji tělesa.

2.3.1 Geometrie a výpočet parametrů



Obrázek 6: Geometrie netradičního štípacího testu [10]

Vztahy pro výpočet funkcí odvozených z hodnot parametrů K a T , B_1 a B_2 byly použity totožné jako pro výchozí štípací test.

3. Výpočetní techniky lomově-mechanických parametrů používané v softwarech

3.1. Metoda extrapolace posunů

Ansys Mechanical je jako jeden z mnoha program pracujících na principu metody konečných prvků. Znamená to, že každý model je podle určených vstupních hodnot rozdělen na konečný počet miniaturních částí, prvků, tvořících síť pokrývající celé těleso. Analýza je pak vytvořena pro každý prvek samostatně a pro celkový model sestavena z dílčích výsledků pro jednotlivé prvky a jejich vzájemného působení. Hranice každého prvku jsou tvořeny určitým počtem uzlů, dle zvoleného typu prvku [12].

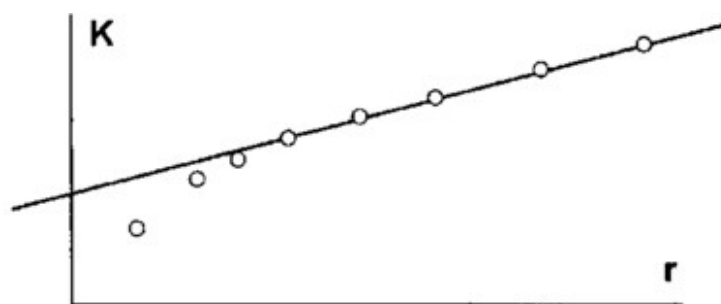
Na výpočet lomově-mechanických parametrů využívá dvou metod. První, nazývaná metoda extrapolace posunů, pracuje s výpočtem K na základě posunů mezi dvěma uzly podél čela trhliny v okolí jejího kořene. Pracuje se závislostí mezi napětími a posuny odvozené z lineární elasticity a idealizace modelu. Tyto posuny se dají v rovině vyjádřit jako:

$$u = \frac{K_I(1+\nu)}{2E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2\chi - 1) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right], \quad (11)$$

$$v = \frac{K_I(1+\nu)}{2E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2\chi - 1) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right], \quad (12)$$

kde u a v jsou posuny v lokálních kartézských souřadnicích, r a θ představují polární souřadnice uzlu, E je modul pružnosti a ν Poissonův součinitel [12]. χ je parametr pružnosti, který je definován jako:

$$\chi = \begin{cases} 3 - \nu & \text{pro rovinnou napjatost} \\ \frac{3-4\nu}{1+\nu} & \text{pro rovinnou deformaci} \end{cases}. \quad (13)$$



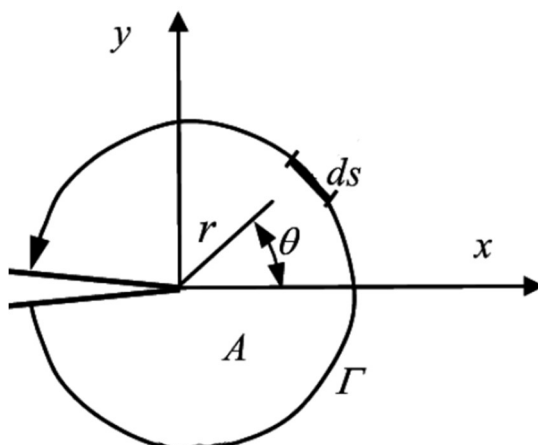
Obrázek 7: Příklad využití extrapolační metody [13]

3.2. Integrační metoda interakce

Druhá využívaná metoda se nazývá integrační metoda interakce. Její výhody spočívají v nižších požadavcích na síť, a i přesto přesnějších výsledcích. K výpočtu je navíc potřeba určení jenom jednoho klíčového uzlu, a to v kořenu trhliny. Tato metoda počítá hodnoty K z uzavřené integrační křivky, která ohraničuje vrchol trhliny. Plocha uvnitř křivky představuje oblast zájmu neboli skutečné pole napětí. Hodnotu K skutečného pole napětí je možno zapsat:

$$K_I(s) = \frac{E}{2(1 - \nu^2)} I(s), \quad (14)$$

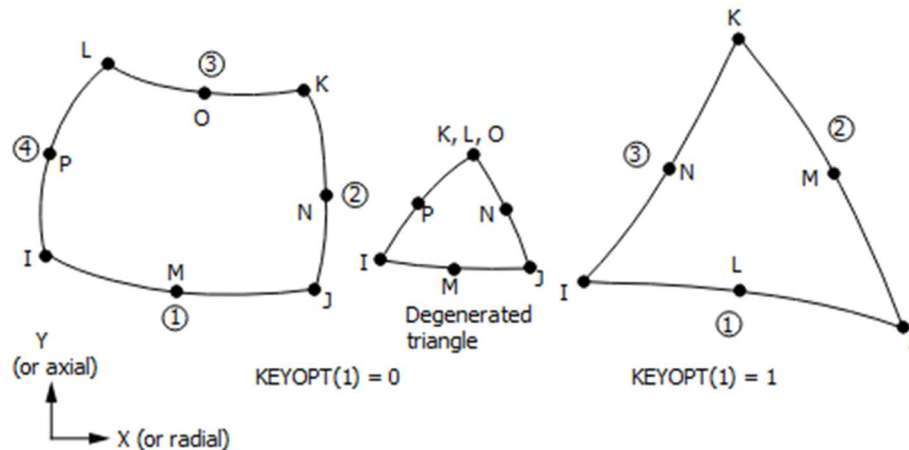
kde $I(s)$ značí interakční integrál křivky s [14].



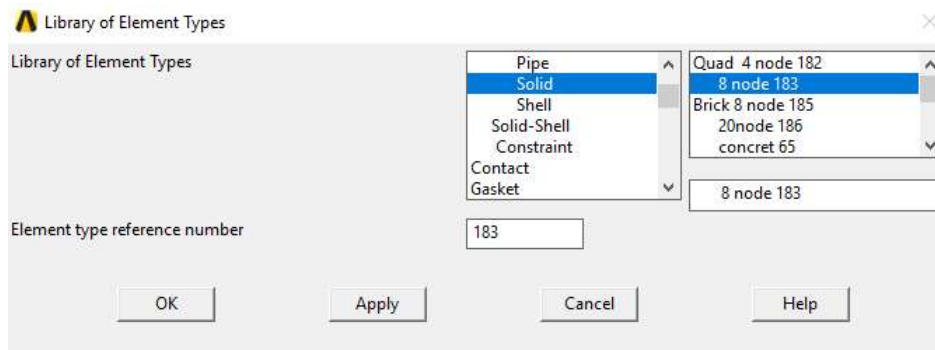
Obrázek 8: Integrační křivka kolem vrcholu trhliny [14]

4. Výpočtové modelování

Numerická podpora byla provedena v softwaru Ansys Mechanical APDL [16]. Tělesa byly simulovány jako 2D modely v úloze pro rovinnou deformaci. Element konečných prvků byl zvolen PLANE183, který je vhodný na modelování také nepravidelné sítě. Skládá se ze 6 uzlů pro trojúhelníkový tvar, nebo 8 uzlů pro čtyřúhelník a v každém z nich má dva stupně volnosti – translační pohyb ve směru x a y [17]. Pro programování bylo vytvořeno makro s parametrizací parametrů pro jednoduchou případnou změnu geometrie.



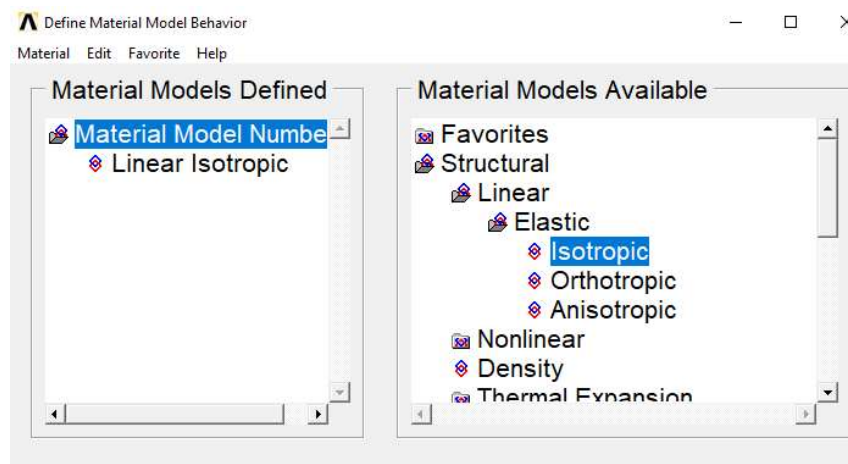
Obrázek 9: Geometrie konečných prvků využívaných elementuem PLANE183 [17]



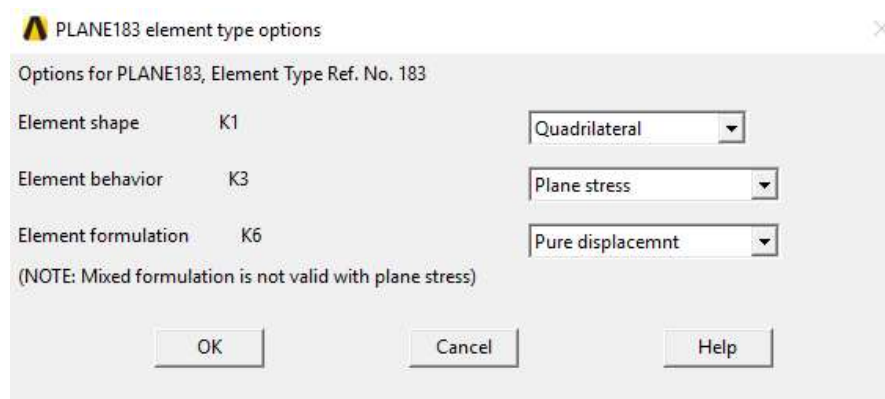
Obrázek 10: Nastavení typu elementu [16]

4.1. Materiálové parametry

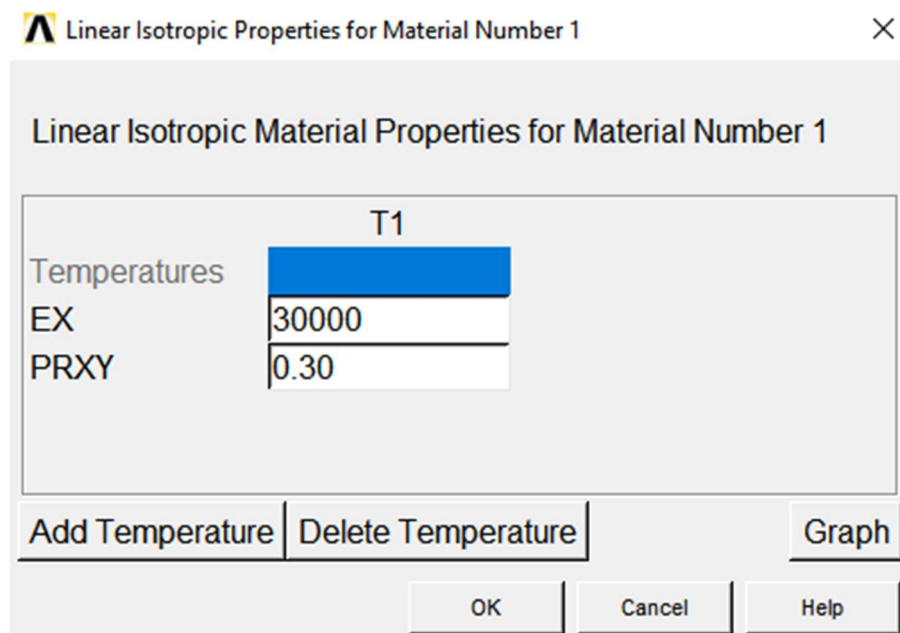
Materiálové charakteristiky byly zvoleny tak, aby odpovídaly betonu C 20/25 a teda modul přetvárnosti $E = 30$ GPa a Poissonův součinitel $\nu = 0,3$. Materiálový model byl zvolen jako lineární elastický isotropický.



Obrázek 11: Nastavení materiálového modelu [16]



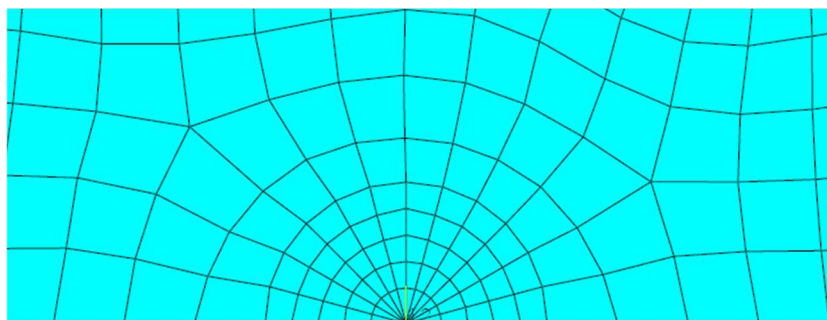
Obrázek 12: Nastavení parametrů elementu [16]



Obrázek 13: Nastavení materiálových charakteristik [16]

4.2. Geometrické parametry

Ve všech případech byla modelována jenom půlka tělesa podle svislé osy procházející trhlinou, vzhledem ke které je těleso symetrické. Počátek souřadnicového systému byl pro zjednodušení výpočtu určen v počátku trhliny. Obrys tělesa byl zadán pomocí jednotlivých klíčových bodů, které byly spojené úsečkami a jednotlivé uzavřené úseky pak tvořily dílčí plochy, které jako celek vytvořily rovinu tělesa. Síť konečných prvků byla nejvíce zjemněna u kořenu trhliny a postupně se velikost elementů zvětšovala přímo úměrně se vzdáleností od trhliny. Pro správnou orientaci os vzhledem k směru růstu trhliny jsou tělesa modelovány na výšku, tedy kratší rozměr orientován ve směru osy x .



Obrázek 14: Modelování sítě v okolí kořene trhliny [16]

4.3. Příkaz CINT a KCALC

Lomově-mechanické parametry byly zjišťované pomocí příkazu *CINT*, který pracuje na principu integrační metody a počítá tedy lomově-mechanické parametry v okolí uzlu, ve kterém je definován vrchol trhliny. Nezbytné pro správný výpočet je nadefinovat typ zjišťovaného parametru ještě před výsledným řešením. Požadované je také zadání počtu obrysů kolem uzlu na čele trhliny, které ohraničují oblasti, pro které se bude integrovat. Hodnota byla nastavená na 5 a jako výsledek se používá jejich pozdější zprůměrování, pro eliminování případné chyby. Nakonec se v příkazu určí osa, která definuje normálu k rovině trhliny, výchozí hodnoty 0 a 2 určuje osu y v kartézských souřadnicích [17].

Na ověření správnosti výsledků faktoru intenzity napětí je použitý také příkaz *KCALC*, který pracuje na principu extrapolace posunů a pro zjištění hodnoty K je nutné definovat kromě uzlu ve vrcholu trhliny také dva další ve směru jejího otevírání rovnoběžně s osou x [17]. Tenhle příkaz však nelze použít jako *CINT* i pro výpočet *T-napětí*.

5. Tvorba modelů zkoušek použitých pro vyhodnocení parametrů

5.1. Třibodový ohyb

Zkouška třibodovým ohybem bude sloužit jako výchozí kalibrační geometrie. Uvažované rozměry tělesa jsou výška $W = 100 \text{ mm}$, rozpětí podpor $S/W = 4$. Rozdíl celkové délky tělesa (spolu s přesahem za podpěrami) a rozteče podpor nemá výrazný vliv na výsledné hodnoty, a proto se pro účel testu tato hodnota zanedbává.

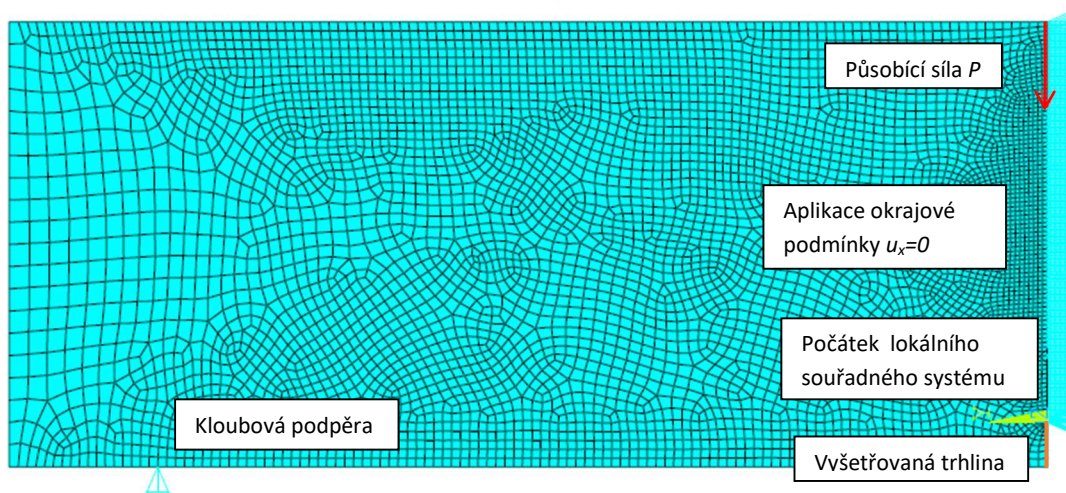
Budou provedeny tři varianty testu, konkrétně s proměnnou velikostí působící síly P 50, 500 a 5000 kN. Sledovaná bude závislost parametrů na poměru $\alpha = a/W$.

Úlohou této části bude porovnání parametrů $B_1 = f(a/W)$ a B_2 s tabulkovými hodnotami v příručce [6]. Vyhodnocení proběhne pro $\alpha = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ a $0,9$. Použité vztahy pro výpočet s programem stanovených hodnot budou:

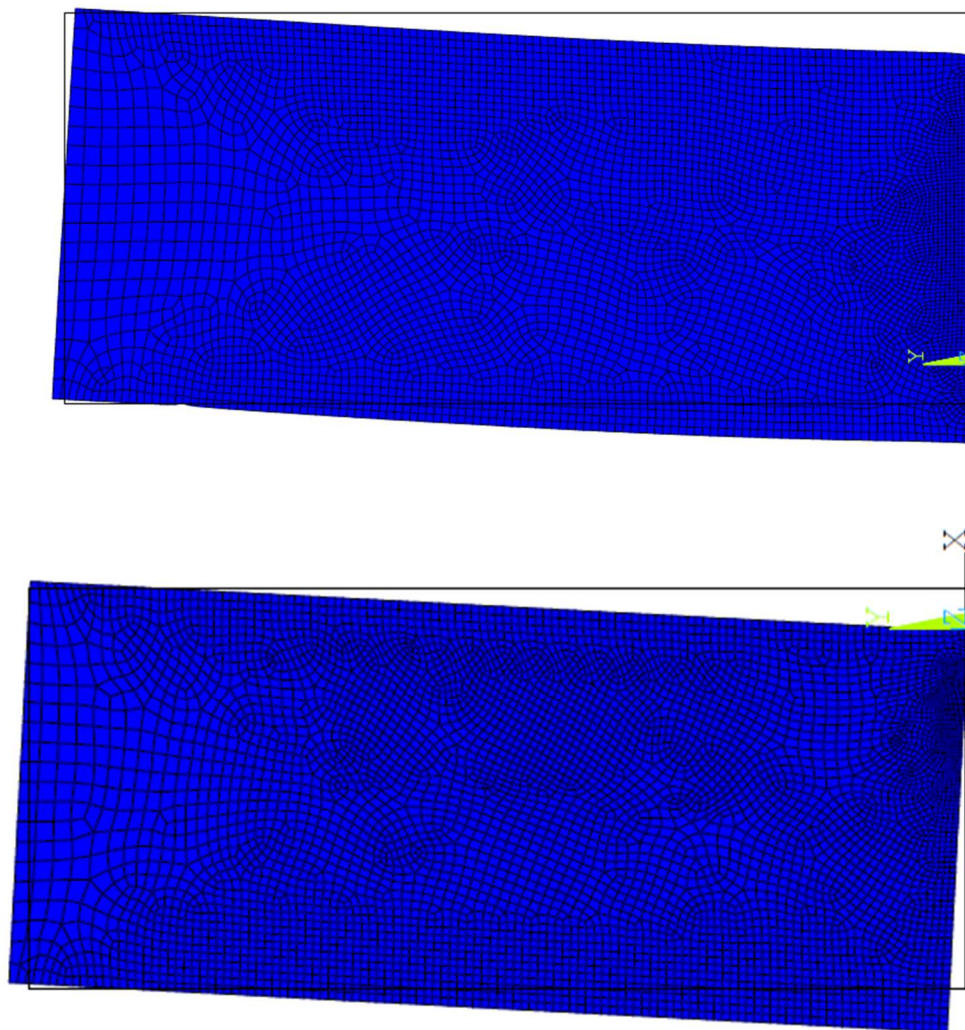
$$B_1 = \frac{K_I}{\sigma\sqrt{\pi a}} \text{ a} \quad (15)$$

$$B_2 = \frac{T\sqrt{\pi a}}{K_I}. \quad (16)$$

Počátek souřadného systému je umístěn ve vrcholu trhliny a osa x je rovnoběžná s předpokládaným směrem růstu trhliny. Osa y směřuje kolmo na ní a probíhá tělesem, které je orientováno na výšku. Vzhledem na absenci druhé poloviny je prostoru mezi kořenem trhliny a spodním okrajem přidána okrajová podmínka, tedy je bráněno v translačním pohybu ve směru y . Vzhledem na idealizaci modelu se zanedbává vlastní tloušťka počáteční trhliny a uvažuje se jako dokonale tenká.



Obrázek 15: Numerický model tělesa [16]



Obrázek 16: Demonstrace deformace tělesa pro $\alpha = 0,1$ (nahore) a $0,9$ (dolů) [16]

5.2. Tahová zkouška na tělese s oboustrannou trhlinou

Zkoušení těles tahem jsou ideální na zjišťování lomově-mechanických parametrů. Vzhledem však na už vzpomínané nevyhovující vlastnosti betonu a cementových kompozit v tahu jejich využití pro tyto účely není normované. Zkouška tělesa s oboustrannou trhlinou při zatížení tahem bude sloužit na porovnání se zkouškou tělesa zatíženého tahem za ohybu, kterou představuje štípací test.

Těleso bude modelováno jako 2D model. Vzhledem na výskyt dvou trhlín budou rozměry tělesa zdvojnásobené, tedy výška $2 \cdot W = 200 \text{ mm}$ a rozpětí $2 \cdot 500 = 1000 \text{ mm}$. Výsledný poměr je teda uvažován $H/W=5$. Délka trhliny je uvažována od kořene k bližšímu okraji.

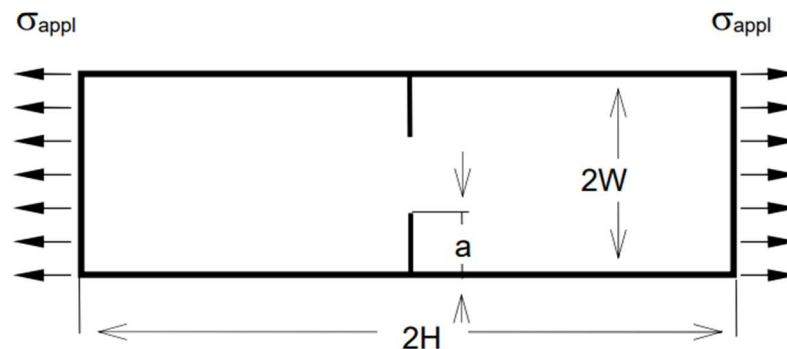
Zatížení bude vyvozené tahovým napětím $\sigma_{apl} = 1000 \text{ Pa}$ působícím na kratší okraj tělesa.

Délka obou trhlín bude růst současně a výsledné hodnoty budou vztaženy k parametru $\alpha = a/W$. Budou uvažovány případy pro poměry $\alpha = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$. Hodnoty lomově – mechanických parametrů budou opět porovnány s tabulkovými hodnotami [6]. Vztahy pro výpočet koeficientů Williamsova rozvoje budou použité stejné jako pro třibodový ohyb;

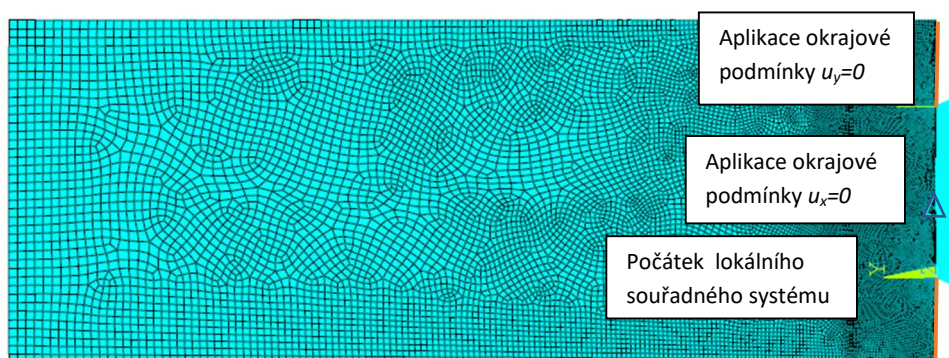
$$B_1 = \frac{K_I}{\sigma \sqrt{\pi a}} \text{ a } B_2 = \frac{T \sqrt{\pi a}}{K_I}, \quad (17)$$

kde $\sigma = \sigma_{apl} = 1000 \text{ Pa}$.

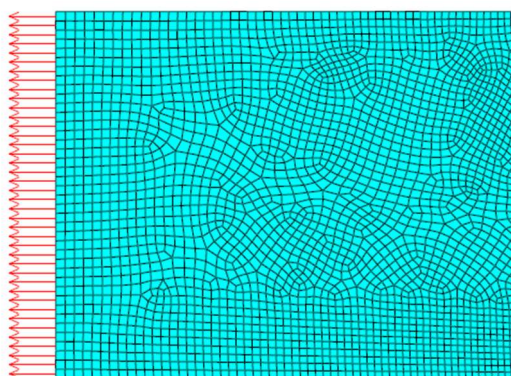
Modelované těleso je rovněž modelované jako poloviční, rozděleno osou symetrie probíhající osou trhlín. Nahrazení zbylé poloviny zabezpečuje okrajová podmínka, která zamezuje pohybu ve směru kolmém na směr růstu trhliny, aplikovaná na úsečku spojující kořeny trhlín. Pro zabezpečení řešitelnosti programem bylo nutno přidat okrajovou podmínku. Ta byla aplikovaná tak, že v poloviční vzdálenosti mezi trhlínami bylo zamezeno pohybu ve směru osy symetrie tělesa. Počátek souřadnic byl určen ve vzdálenosti a od okraje tělesa. Vzhledem na symetrii a stejné podmínky se parametry obou trhlín shodují, ve výsledcích se teda bude pracovat s údaji pro trhlínu 1.



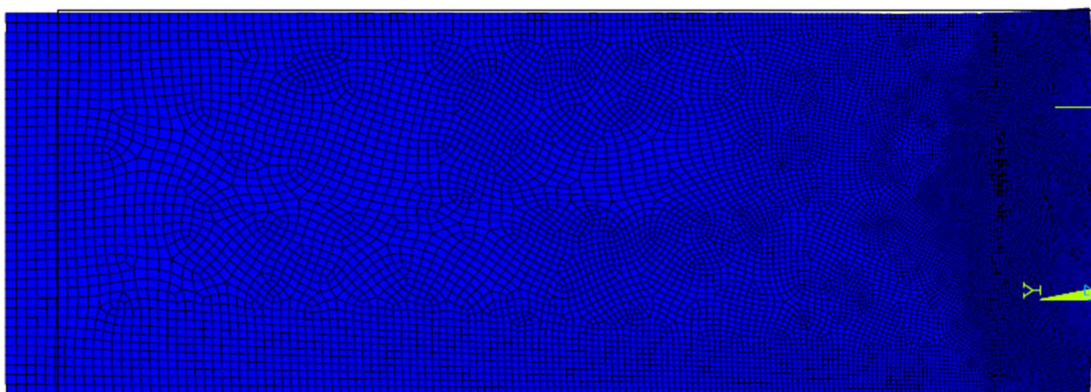
Obrázek 17: Schéma geometrie tělesa s oboustrannou trhlinou při tahovém zatížení



Obrázek 18: Numerický model tělesa [16]



Obrázek 19: Aplikace zatížení na model [16]



Obrázek 20: Demonstrace deformace tělesa vlivem zatížení při $\alpha=0,5$ [16]

5.3. Štípací test

Tradiční štípací test bude sloužit jako vzorová geometrie pro pozdější modifikaci. Geometrie modelu bude do 2D promítnutá jako čtverec s výřezem pro umístění zatěžovacího zařízení podle *obrázku 5*. Poměr rozpětí podpor k výšce S/W bude volen 1 a bude nahrazovat liniovou podporu umístěnou uprostřed délky tělesa.

Zatížení tělesa bude vyvozeno pomocí dvojice sil, na které se rozkládá šikmá síla působící pomocí klínu. Síla působící ve vodorovném směru bude určena

$$P_{sp} = 1000 \text{ kN}$$

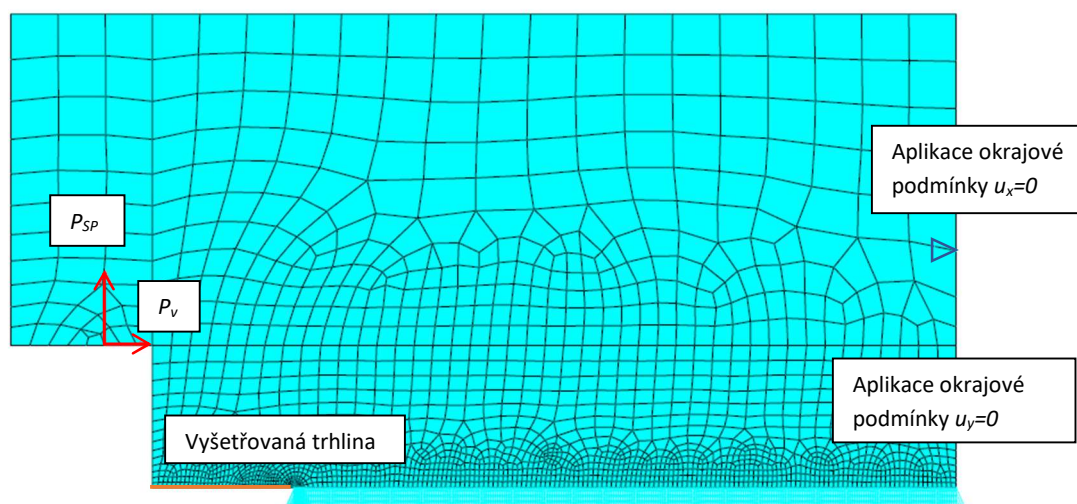
a síla ve svislém směru bude na půlku tělesa aplikovaná

$$P_v = \frac{1}{2} P_{sp} \cdot 2 \tan(\alpha_w) . \quad (18)$$

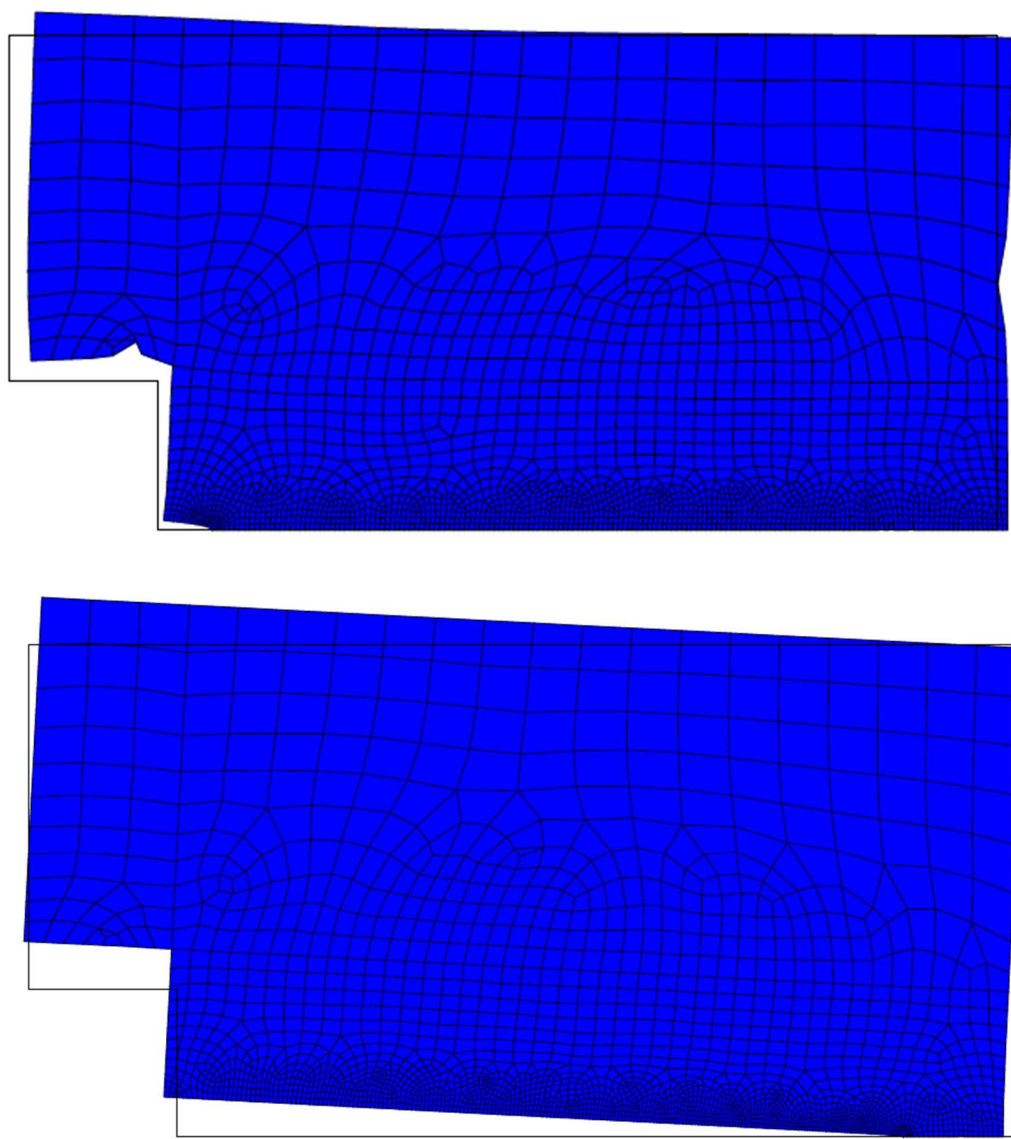
Sledován bude poměr mezi rostoucí délkou trhliny a šířkou $\alpha = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7$ a $0,8$ a na nichž závislých hodnot B_1 a B_2 . Na výpočet koeficientů bude využito vztahů zmíněných v části 2.2.1. a výsledné hodnoty graficky znázorněny.

Obdobně jako v předchozích případech bude modelováno pouze těleso poloviční s okrajovou podmínkou nahrazující zbylou část tělesa. Druhou okrajovou podmínkou bude simulováno kloubové uložení tělesa v průběhu testu. Lokální kartézský souřadný systém má počátek ve vrcholu trhliny.

V závěru bude vyhodnocena matematická závislost hodnoty parametrů B_1 a B_2 a poměru α z dosažených výsledků.



Obrázek 21: Numerický model tělesa se zatížením [16]



Obrázek 22: Demonstrace deformace tělesa vlivem zatížení při $\alpha = 0,1$ (nahore) a $0,8$ (dolů) [16]

5.4. Netradiční štípací test

Tato geometrie bude hlavním předmětem zkoumání práce. Jak už bylo zmíněno, hlavní modifikací bude přítomnost ne jedné, ale dvou trhlin jak při horním, tak spodním okraji. Geometrie tělesa znázorněna na *obrázku 6* odpovídá kvádru s příložkami po obou stranách klínu, proto je působiště zatížení určeno právě v téhle části, konkrétně v jedné čtvrtině výšky.

Konkrétně jde o zatížení stejného charakteru jako v předchozím případě, a to tedy silou vodorovnou

$$P_{sp} = 1000 \text{ kN}$$

a vzhledem na úhel klínu silou taky svislou

$$P_v = \frac{1}{2} P_{sp} \cdot 2 \tan(\alpha_w).$$

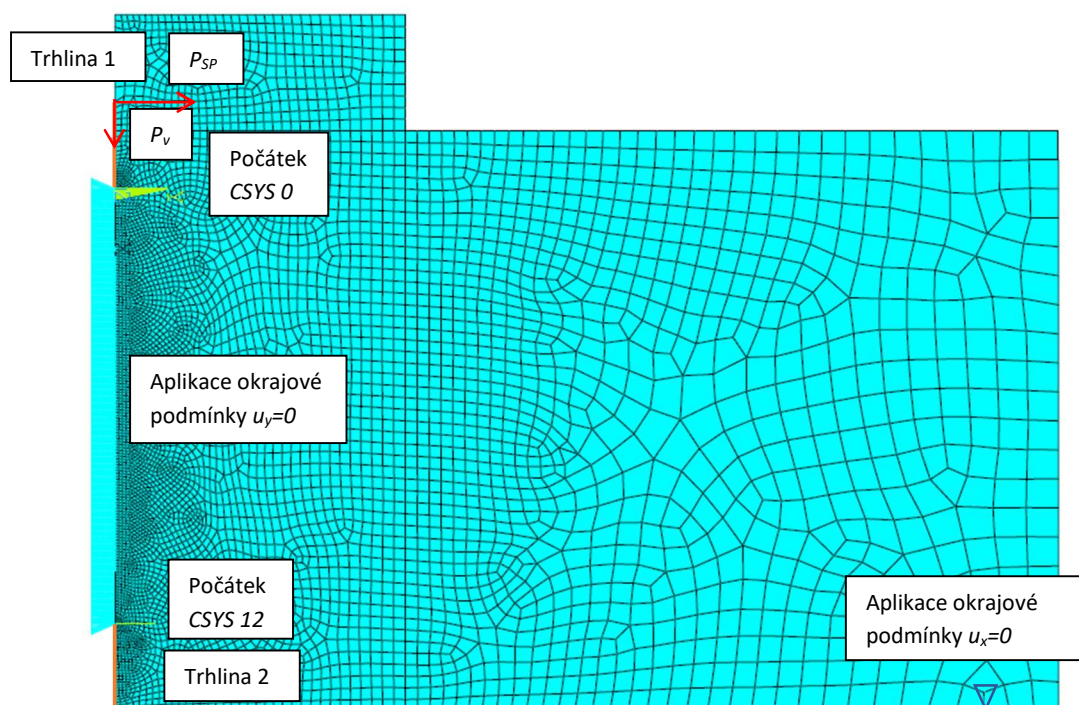
Rozpětí podpor bude v průběhu studie postupně měněno, a to v poměrech $S/W = 1; 2; 3$ a 4 . Sledovaná bude závislost mezi koeficienty B_1, B_2 vztažené k parametrům obou trhlin, takže celkově koeficienty $4; B_1(K_1), B_1(K_2), B_2(T_1)$ a $B_2(T_2)$. Indexy parametrů indikují příslušnost k trhlíně, 1 k trhlíně horní, rozvírající se z působiště síly a 2 pro trhlínu šířící se od spodního líce.

Simulace proběhla na 3 případech. V prvním se obě trhlíny šířily současně v poměrech k šířce $\alpha = 0,1; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,45$ a $0,50$. Ve zbylých dvou si jedna trhlína zachovávala konstantní délku a druhá rostla, následně se sled mezi trhlínami vyměnil. Trhlíny konstantních délek byly v poměru $\alpha = 0,1; 0,15; 0,20; 0,25$ a $0,30$,

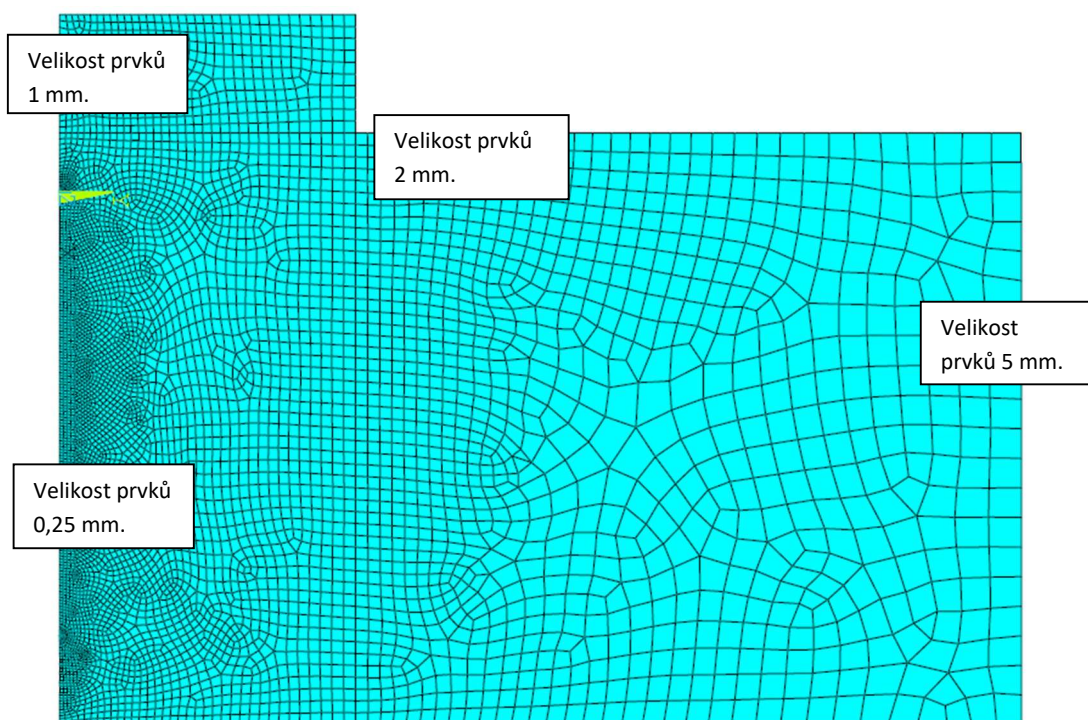
Tělesu rozděleno v ose trhlin budou stanoveny zbylá polovina nahrazena okrajovou podmínkou stejně jako v předchozím případě. Druhá nahrazující kloubovou podpěru zabráňující pohybu ve směru x bude uložena podle parametrického rozměru podpor.

Původní systém souřadnic byl umístěn ve vrchole trhlíny 1. Pro výpočet parametrů druhé trhlíny, které se už vzhledem na rozdílnou vzdálenost od působiště síly nebudou rovnat, bylo nutno v programu Ansys vytvořit nový souřadný systém. Jeho počátek byl umístěn ve vrcholu trhlíny 2 s osou x směřující k neporušené části tělesa a y rovnoběžně s původním směrem. Nově vytvořen kartézský systém bude označen číslem 12 (CSYS 12).

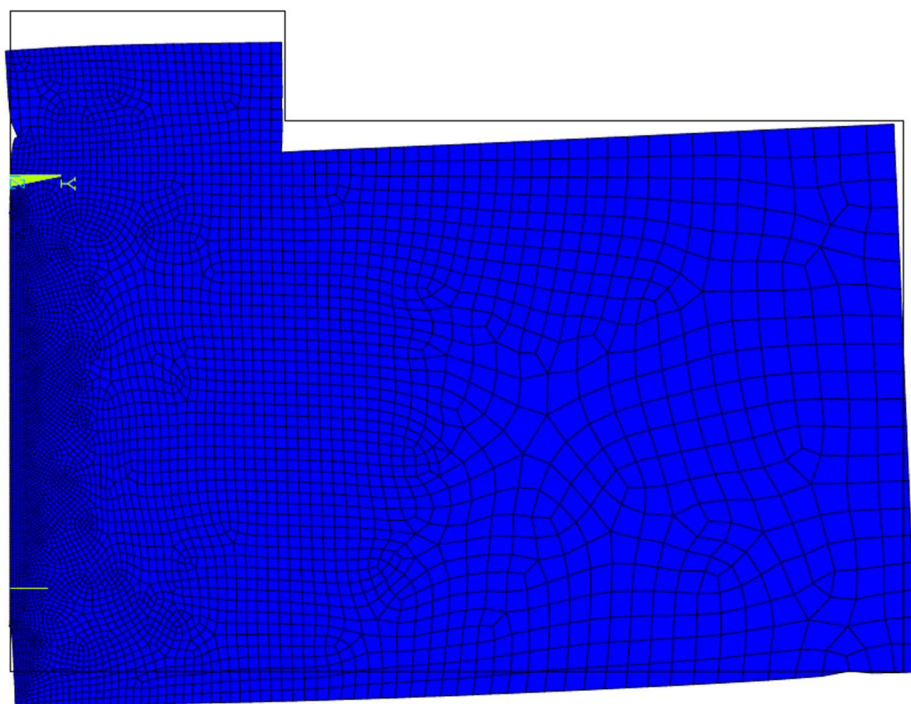
Hodnoty parametrů B_1 a B_2 budou graficky znázorněny v závislosti na dálce rostoucí trhlíny. Rovněž budou v závěru použity na získání rovnice vyjadřující závislost pro jednotlivé případy na poměru α .



Obrázek 23: Numerický model tělesa se zatížením; $S/W=3$ [16]



Obrázek 24: Numerický model tělesa s velikostí prvků sítě [16]



Obrázek 25: Předpokládaná deformace tělesa; poměr α pro obě trhliny 0,25 [16]

6. Výsledky a vyhodnocení

6.1. Třibodový ohyb

Tato část sloužila k porovnání výsledků získaných z výpočtového prostředí a tabulkových hodnot podle [6], tedy pro ověření správnosti modelování. Výsledné hodnoty lomových parametrů prokázali přímou závislost na působící síle. To znamená že velikost napětí v kořenu trhliny vzrůstá v závislosti na působící síle P . Můžeme ho tedy vypočítat ze vztahu:

$$\sigma = \frac{3PS}{2W^2B}; \text{ po dosazení pro síly působící v průběhu analýzy } P=50;500; 5000 \text{ dostáváme}$$

$$\sigma = \frac{3 \cdot 50 \cdot 400}{2 \cdot 100^2 \cdot 1} = 6 \text{ MPa};$$

$$\sigma = \frac{3 \cdot 500 \cdot 400}{2 \cdot 100^2 \cdot 1} = 60 \text{ MPa};$$

$$\sigma = \frac{3 \cdot 5000 \cdot 400}{2 \cdot 100^2 \cdot 1} = 600 \text{ MPa}.$$

Tyto hodnoty můžeme pak dosadit do vzorců pro analytický výpočet lomové – mechanických parametrů. Pro porovnání vezmeme hodnoty příslouchající $\alpha=0,1$.

Tabulka 1: Porovnání parametru K z numerické analýzy s analytickým výpočtem pomocí tabulek

KCALC			CINT			Knésl, Bednář		
$K_I(P=50)$	$K_I(P=500)$	$K_I(P=5000)$	$K_I(P=50)$	$K_I(P=500)$	$K_I(P=5000)$	$K_I(P=50)$	$K_I(P=500)$	$K_I(P=5000)$
32,993	329,93	3299,3	32,961	329,610	3296,097	32,856	328,565	3285,646

Z tabulky možno pozorovat dostatečnou správnost výsledku. Obdobným způsobem můžeme porovnat taky správnost výpočtu T -napětí.

Tabulka 2: Porovnání parametrů K z numerické analýzy s analytickým výpočtem pomocí tabulek

CINT			Knésl, Bednář		
$T(P=50)$	$T(P=500)$	$T(P=5000)$	$T(P=50)$	$T(P=500)$	$T(P=5000)$
-2,093503	-20,935	-209,35029	-2,177953	-21,77953	-217,79535

Z výsledků je tedy zřejmá správnost závislostí mezi parametry a koeficienty B_1 a B_2 , které byly použity pro jejich výpočet. Pro lepší přehlednost nebude ve všech následujících analýzách porovnáváno parametrů K a T – napětí, ale samotných koeficientů. Použity budou tedy stejné vztahy, ale pro výpočet s parametry z numerické analýzy.

Při porovnání výsledných hodnot z programu Ansys se prokázala už předpokládaná větší přesnost příkazu CINT než KCALC. Proto bude tato metoda výpočtu považována za klíčovou a KCALC jenom za přibližnou neboli kontrolní. Pro porovnání T – napětí není použití tohoto příkazu možné.

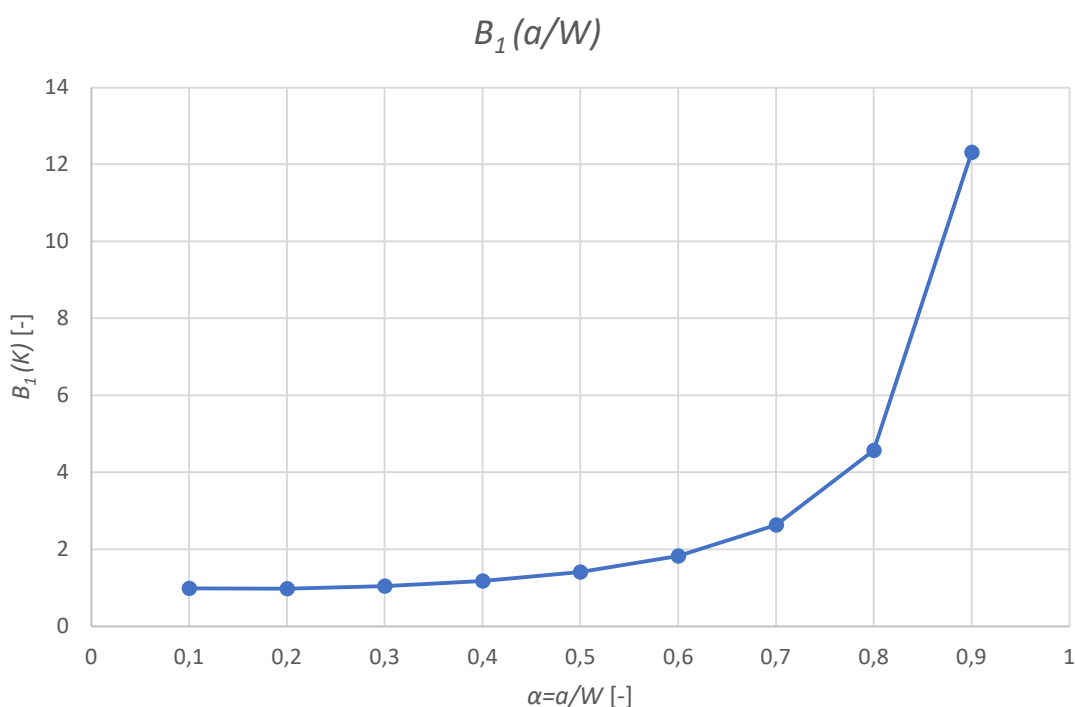
Dále proběhlo porovnání pro zbylé poměry α pro oba parametry.

Tabulka 3: Porovnání parametrů B_1 , B_2 pro třibodový ohyb získaných pomocí numerické analýzy s tabulkovými hodnotami

α	KCALC	CINT		Knésl, Bednář	
	$B_1(K)$	$B_1(K)$	$B_2(T)$	$B_1(K)$	$B_2(T)$
0,10	0,981	0,980	-0,356	0,977	-0,37
0,20	0,978	0,977	-0,240	0,977	-0,248
0,30	1,041	1,040	-0,124	1,039	-0,131
0,40	1,174	1,172	-0,003	1,172	-0,01
0,50	1,408	1,406	0,125	1,405	0,118
0,60	1,822	1,820	0,267	1,819	0,26
0,70	2,629	2,626	0,439	2,624	0,43
0,80	4,570	4,565	0,678	4,561	0,666
0,90	12,327	12,315	1,148	12,291	1,113

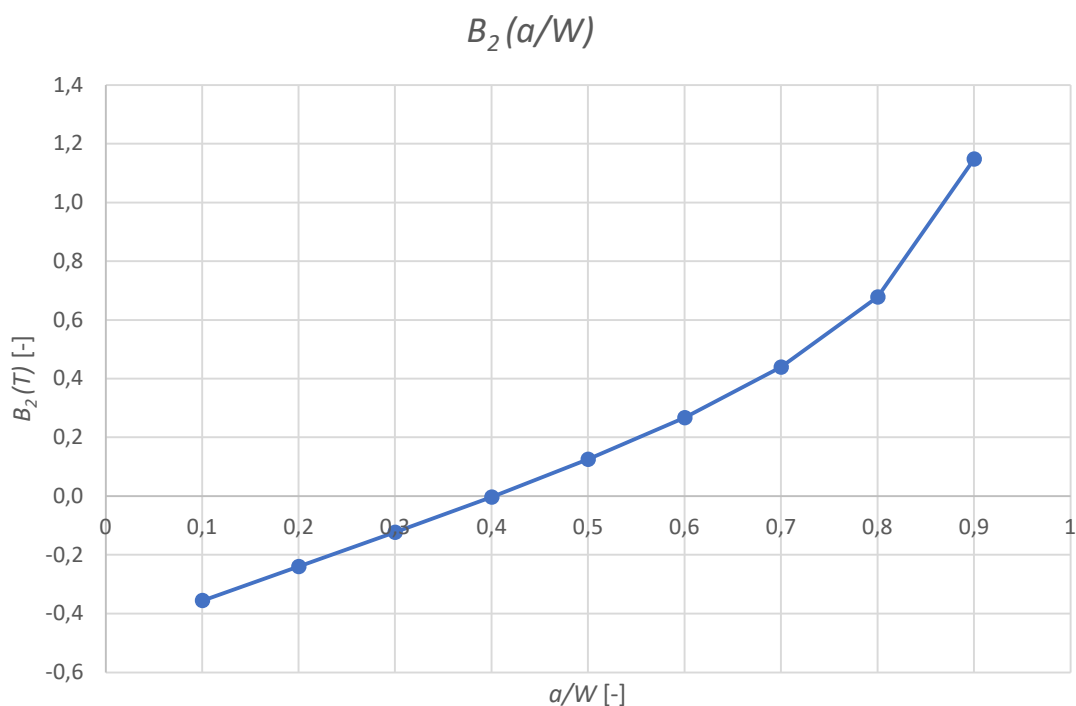
Nejvyšší rozdíl můžeme vidět při $\alpha=0,9$, kdy na působící napětí vplývá velká blízkost působící síly a deformace tělesa. Vzhledem na prokázání správnosti modelování můžeme posoudit hodnoty za dostatečně přesné.

Po vynesení závislosti parametrů B_1 na délce trhliny neboli jeho poměru k rozměru tělesa vznikne křivka, které můžeme následně přiřadit polynom odpovídající funkce.

**Obrázek 26:** Závislost parametru $B_1(\alpha)$ pro třibodový ohyb

Grafické znázornění tedy udává správnost předpokladu přímé úměry napětí ve vrcholu trhliny na její velikosti.

Obdobný postup je možno využít také pro parametr B_2 .



Obrázek 27: Závislost parametru $B_2(\alpha)$ pro tříbodový ohyb

Největší rozdíly je možno opět pozorovat při maximálních hodnotách použitých poměrů. To vede k předpokladu zvýšené směrové nestability v důsledku velikosti působícího napětí ve vrcholu a přímé závislosti parametru na hodnotě koeficientu intenzity napětí.

6.2. Tahová zkouška na tělese s oboustrannou trhlinou

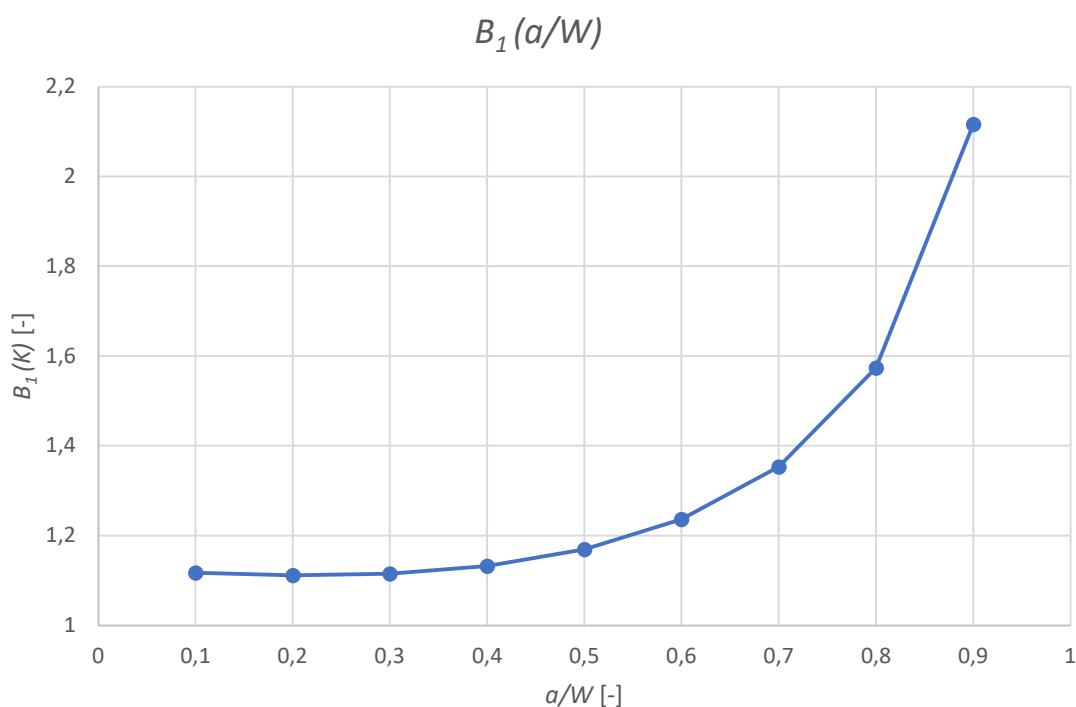
Tahová zkouška byla modelována na tělese s dvojnásobní výškou v poměru k šířce pro získání hodnot poměrů α až do hodnoty 0,9. V případě výskytu dvou trhlin by při klasické hodnotě rozměru bylo možné získat pouze poloviční rozmezí poměrů. Umožnilo to taky porovnání výsledků s již zmíněným zdrojem.

Tabulka 4: Výsledné hodnoty parametrů pro tahovou zkoušku z numerického modelování a jejich porovnání

α	CINT		Knésl, Bednář	
	$B_1(K)$	$B_2(T)$	$B_1(K)$	$B_2(T)$
0,10	1,117	-0,510	1,108	-0,514
0,20	1,112	-0,486	1,111	-0,486
0,30	1,115	-0,486	1,114	-0,486
0,40	1,132	-0,486	1,132	-0,486
0,50	1,169	-0,480	1,169	-0,48
0,60	1,236	-0,464	1,235	-0,464
0,70	1,353	-0,433	1,352	-0,433
0,80	1,574	-0,385	1,572	-0,385
0,90	2,116	-0,320	2,106	-0,322

I v tomto případě můžeme pozorovat zvýšení hodnot parametrů s délkou trhliny, ale už neprobíhá v tak velké míře. Za důvod je možno brát působení síly, které se v průběhu zatěžování nemění, zůstává konstantní a počátek trhliny se k němu nepřibližuje. Napětí ve vrcholu trhliny není tedy přímo ovlivněno blízkostí působící zatěžovací síly jako v předchozím případě. Model je vzhledem k rozměrům trhliny k vzdálenosti působení možno přirovnat k vzdálenému napětí v nekonečné desce.

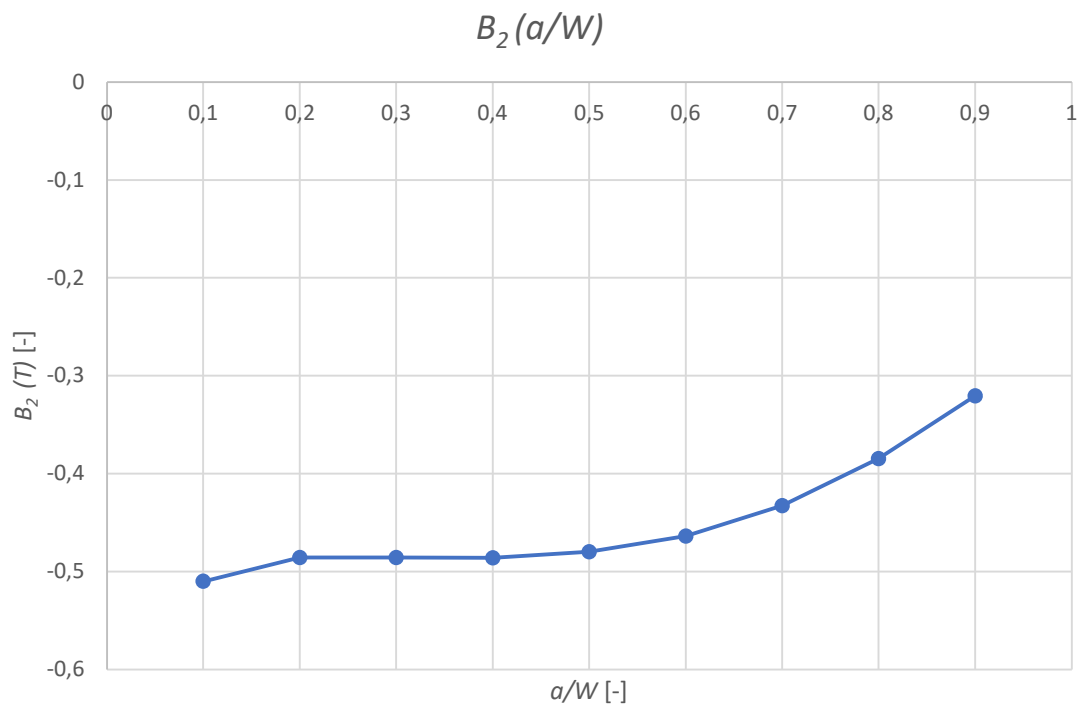
Největší rozdíly je opět možno pozorovat v horních mezích intervalu, kdy opět velká deformace tělesa způsobuje zvýšené napětí ve vrcholu trhliny i její směrovou stabilitu.



Obrázek 28: Závislost parametru $B_1(\alpha)$ pro tahovou zkoušku

Největším rozdílem oproti předchozímu testu, který je zřejmě čitelný z grafu je, že hodnota B_1 se nepřibližuje k nulové hodnotě ale k hodnotě 1. Možno to vysvětlit rozdílem působení síly a napětí. Pokud je totiž těleso zatěžováno konstantní silou, napětí se mění vzhledem na blízkost k působišti. Při aplikaci tahového napětí se však hodnota napětí ve vrcholu nemůže rovnat hodnotě menší jako je hodnota působícího tahového napětí, tedy koeficient intenzity napětí nemůže klesnout pod hodnotu 1.

Grafické znázornění průběhu je sice obdobné, avšak interval rozmezí hodnot je několikanásobně menší, což vede k ověření předpokladu nevhodnosti zkoušky vzhledem na malou pružnost betonu a jeho vysokou křehkost.



Obrázek 29: Závislost parametru $B_2(\alpha)$ pro tahovou zkoušku

Funkce poměru napětí je v celém průběhu v záporných hodnotách, které vzhledem na tahové napětí působící kolmo na růst trhliny poukazuje na tlak vyvozený v rovině trhliny. Tlakové napětí zaručují směrovou stabilitu trhliny. Průběh vykazuje opět mírnější průběh jako v předchozím případě, což znamená že trhlina má tendenci zachovávat svojí směrovou stabilitu a napětí zůstávat ve vysokých záporných hodnotách, až po poměr $\alpha=0,6$, kdy se postupně začíná zvětšovat a ztrácí počáteční stabilní směr.

6.3. Štípací test

Výchozí geometrie pro modifikaci byla zvolena vzhledem na běžné využití pro laboratorní zkoušky a jednoduchost provedení. Možno taky výsledky porovnat už z již provedenými studiemi, např. [9]. Rozdílem oproti třibodovému ohybu je růst trhliny směrem od působiště síly, a ne k ní, z toho důvodu se nepředpokládá výrazný vliv blízkosti působiště. K otevírání trhliny dochází navíc hlavně silou vodorovnou, několikanásobně vyšší, než je síla svislá, čím se dá přiblížit testu tahovým napětím.

Hodnota síly vodorovné je zvolena $P_{sp} = 1000 \text{ kN}$ a na ní závislá síla svislá, působící na modelovanou půlku tělesa, pro úhel klínu 30° :

$$P_v = \frac{1}{2} P_{sp} \cdot 2 \tan(\alpha_w) = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 2 \tan(30) = 577,35 \text{ kN}.$$

Pro výpočet je nutno vyčíslit také velikost parametru K_0 :

$$\text{kde } K_0 = \frac{P_{SP}}{B\sqrt{w}} = \frac{1000}{1 \cdot \sqrt{100}} = 100 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}.$$

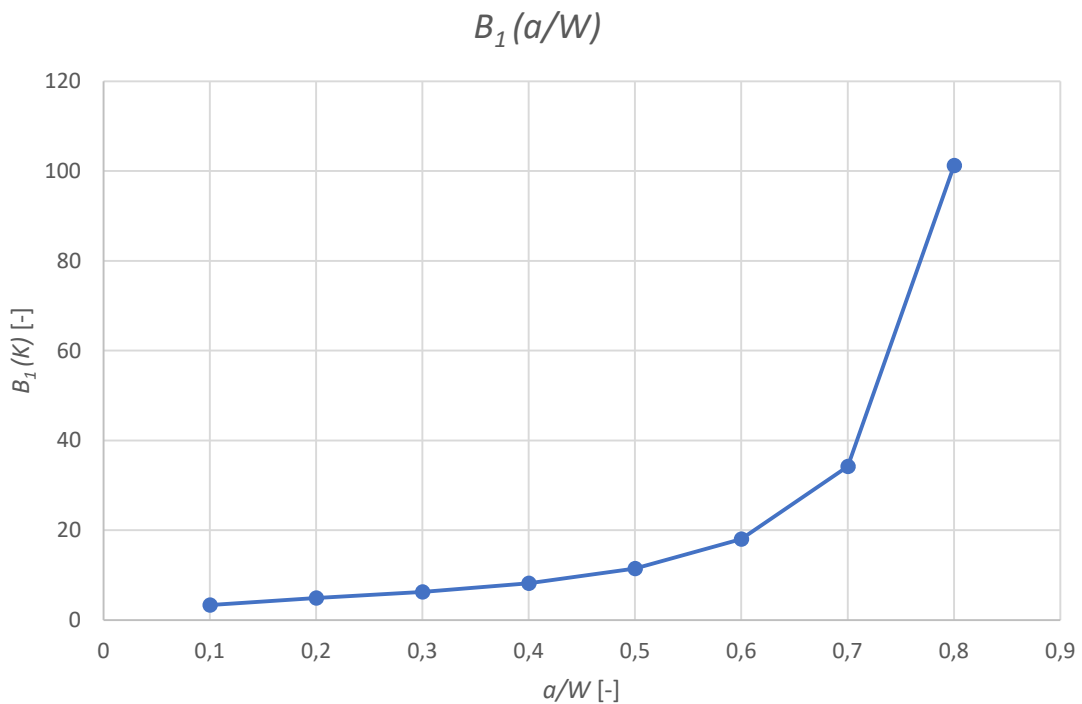
Hodnota parametru B_1 se pak vyčíslí pomocí vztahu $B_1 = \frac{K_I}{K_0}$.

Tabulka 5: Výsledné hodnoty parametrů B_1 , B_2 z numerického modelování

α	CINT	
	$B_1(K)$	$B_2(T)$
0,10	3,375	-9,458
0,20	4,940	-8,664
0,30	6,286	-8,361
0,40	8,227	-7,496
0,50	11,496	-6,118
0,60	18,000	-4,371
0,70	34,249	-2,535
0,80	101,252	-0,948

Vzhledem na výsledky je možno vyvodit závěr, že koncentrace napětí ve vrcholu trhliny vyvozeného pomocí klínu je až desetinásobně vyšší jako při působení osamělé síly při třibodovém ohybu a převyšující rovněž koncentraci v průběhu tahové zkoušky. To potvrzuje rovněž předpoklad větší vhodnosti testu pro vyhodnocování lomové – mechanických parametrů.

Vzhledem na délku trhliny uvažovanou od působiště síly k výšce uvažované jako celý svislý rozměr je možno dosáhnout maximálního poměru $\alpha=0,8$.



Obrázek 30: Závislost parametru $B_1(\alpha)$ pro štípací test.

Po grafickém znázornění je průběh křivky závislosti parametru B_1 na délce trhliny přirovnatelný spíše k tříbodovému ohybu než zatížení tahovým napětím. Funkce křivky rovněž vykazuje dolní hranici blížící se k nulovým hodnotám. To opět souvisí s vyvozením zatížení pomocí dvojicí sil na rozdíl od rovnoměrného napětí. Z průběhu grafu je možno taky zřejmé použití testu jako ekvivalentní zkoušky při zatížení v tahu za ohybu.

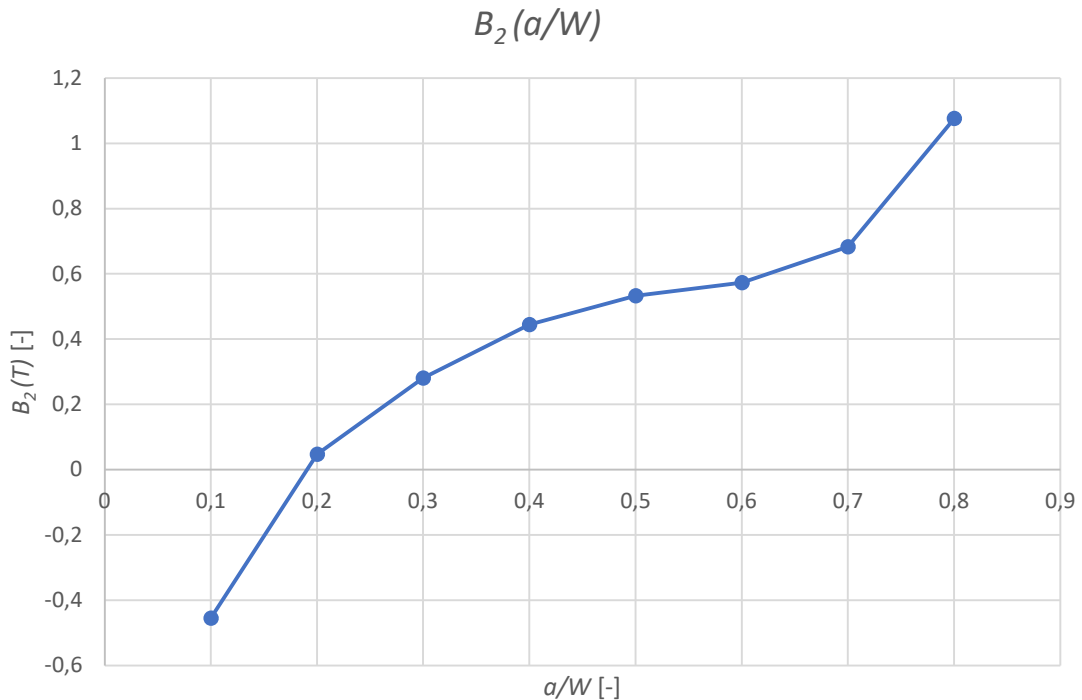
Průběh je porovnatelný s výsledkem studie [9]. Maximální hodnoty se však velikostně liší v důsledku rozdílných vstupních parametrů modelu, a tedy pevností betonu, který je uvažován jako kvazi-křehký materiál pro obě studie. Je teda možno vyhodnotit, že s rostoucí pevností betonu klesá koncentrace napětí ve vrcholu trhliny.

Numerickou závislost možno vyjádřit:

$$B_1(\alpha) = 8307,5\alpha^5 - 15590\alpha^4 + 11052\alpha^3 - 3588,1\alpha^2 + 532,47\alpha - 23,669;$$

$$R^2 = 0,9996.$$

V rovnici křivky vytvořené pomocí výsledků modelování jsou viditelné hodnoty koeficientů mnohonásobně vyšší jako u předchozích modelů, což zodpovídá závislosti parametrů na hodnotách faktoru intenzity napětí.



Obrázek 31: Závislost parametru $B_2(\alpha)$ pro štípací test.

T – napětí prochází ze záporných hodnot na kladné při poměru přibližně $\alpha = 0,19$. Průběh je opět porovnatelný více s namáháním tahem za ohybu než rovnoměrným tahovým zatížením, ale tahová napětí působí pouze v počáteční fázi růstu trhliny. Následně prochází na tahové s tendencí zachování minima a směrové stability hlavně na intervalu $\langle 0,4-0,7 \rangle$.

Při porovnání se studií [9] pro stejný rozměr a podepření, tedy část 4.b je pozorovat podobnost průběhu křivek a délky trhliny na přechodu, avšak maximální hodnoty jsou v tomto případě opět vyšší pro model s horšími materiálovými parametry. Proto lze usoudit, že v tělese z kvazi-křehkého materiálu s větší pevností se bude trhlina šířit stabilněji než pro materiály s horšími.

Matematickou závislost odvozená z grafického průběhu závislosti lze zapsat jako:

$$B_2(\alpha) = 228,27\alpha^5 - 623,32\alpha^4 + 615,63\alpha^3 - 254,53\alpha^2 + 49,607\alpha - 12,425;$$

$$R^2 = 0,9999.$$

Hodnoty koeficientů opět mnohonásobně převyšují předchozí případy, což vyjadřuje přítomnost většího napětí ve směru rovnoběžném se směrem růstu trhliny.

6.4. Netradiční štípací test

Při modifikovaném štípacím testu se sledují parametry obou trhlin. Vzhledem na nestejnou polozu zatížení vzhledem k poloze čel trhlin se nemůže uvažovat stejné hodnoty a vyšetřovat pouze jednu trhlínu.

6.4.1. Současný růst délek trhlin

Parametry B_1

V první části se sleduje průběh parametrů při rovnajících se délkách trhlin. Maximálně je tedy možno dosáhnout, vzhledem na uvažované délky trhlin poměru pro obě až do hodnoty $\alpha=0,5$. Zatížení bylo opět vyvozeno dvojicí sil rovnou hodnotám jako u štípacího testu, tedy: silou vodorovnou $P_{sp}=1000\text{ kN}$ a silou svislou, působící na modelovanou půlku tělesa, pro zvolený úhel klínu 30° :

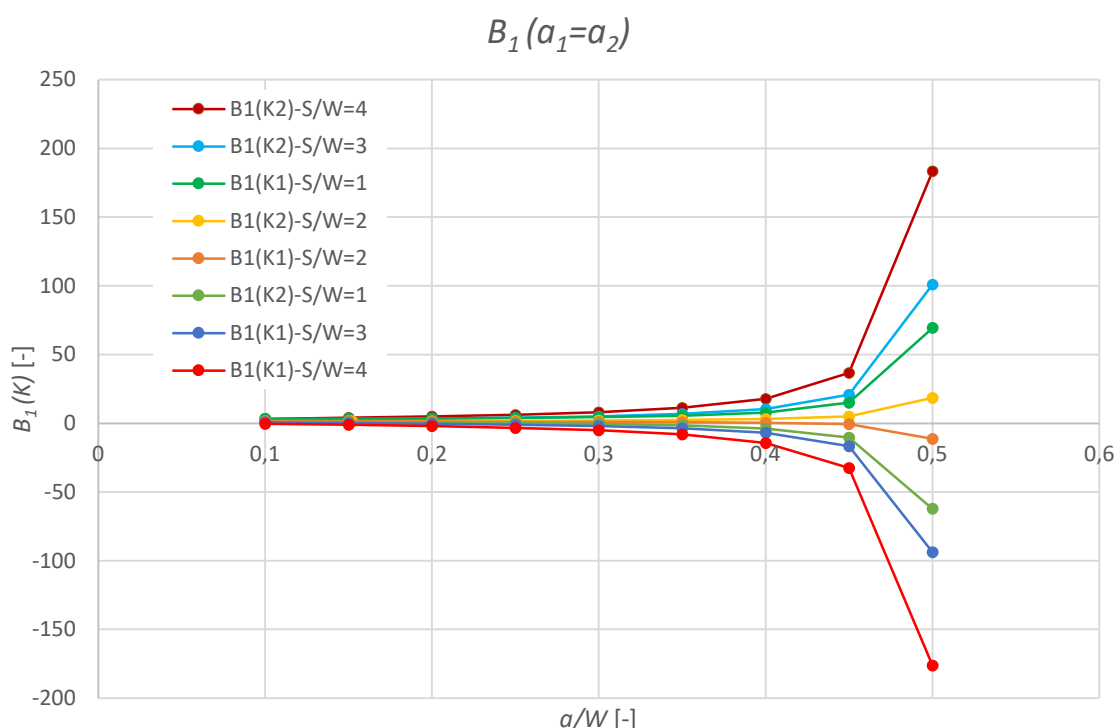
$$P_v = \frac{1}{2} P_{sp} \cdot 2 \tan(\alpha_w) = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 2 \tan(30) = 577,35\text{ kN}.$$

Tabulka 6: Výsledné hodnoty parametrů B_1 pro trhlínu 1 z numerického modelování

$\alpha_1 \backslash S/W$	4	3	2	1
0,10	-0,327	0,689	1,736	3,207
0,15	-1,191	0,102	1,426	3,247
0,20	-2,131	-0,466	1,229	3,447
0,25	-3,343	-1,149	1,071	3,786
0,30	-5,124	-2,114	0,918	4,360
0,35	-8,141	-3,716	0,725	5,441
0,40	-14,362	-7,004	0,364	7,824
0,45	-32,482	-16,628	-0,769	14,889
0,50	-176,167	-93,767	-11,366	69,409

Tabulka 7: Výsledné hodnoty parametrů B_2 pro trhlínu 2 z numerického modelování

$\alpha_2 \backslash S/W$	4	3	2	1
0,10	3,235	2,235	1,267	0,861
0,15	4,016	2,700	1,417	0,781
0,20	4,914	3,214	1,427	0,549
0,25	6,123	3,896	1,422	0,136
0,30	7,966	4,929	1,546	-0,537
0,35	11,154	6,709	1,697	-1,677
0,40	17,743	10,373	1,915	-3,954
0,45	36,689	20,830	2,282	-10,443
0,50	183,321	100,920	3,014	-62,210



Obrázek 32: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro současný růst trhlin pro modifikovaný štípací test

Z výsledků je viditelná závislost napětí ve vrcholu trhliny přímo úměrná na délce tělesa. V případě trhliny 1 umístěné v horní části tělesa s délkou uvažovanou od působíště dvojice sil je zřejmá tendence klesající, dosahující při rozpětí $S/W=4$ záporných hodnot okamžitě a $S/W=3$ při poměru $\alpha=0,2$. Při poměru $S/W=2$ je tak až u $\alpha=0,45$. To znamená, že u prvních dvou variací už od v ranních stádiích růstu má napětí ve vrcholu tlakový charakter, a tedy vůli k uzavírání trhliny. U třetího případu se napětí přibližuje k tlakovým hodnotám, dosáhne je ale až v maximálních mezích. Zajímavostí je opačný průběh u nejmenšího rozměru modelu. Napětí roste přímo úměrně s délkou trhliny. Tenhle případ je nejvíce porovnatelný s průběhem na klasickém štípacím testu, vezmeme-li v potaz rovněž geometrii a umístění trhliny 1 a tendenci šíření vrchní trhliny.

Výsledky pro druhou trhlínu a vzájemný vztah růstu je nejlépe pozorovat na grafickém znázornění. Je zřejmé, že napětí má tendence dosahovat v trhlíně orientované na spodní části tělesa kladných napětí v přibližně stejné míře opačného smyslu jako u horní trhliny. Koeficienty závislé na tomhle napětí jsou opět přímo úměrné rozpětí a dosahují pro $S/W=4, 3, 2$ pouze kladných hodnot. Vezmeme-li v potaz orientaci trhliny, můžeme průběh růstu porovnat s tříbodovým ohybem. S působícím napětím trhlína na spodní straně roste, protože působící zatížení vyvolává ve spodních vláknech, a tedy i ve vrcholu trhliny tahové napětí. Opačnou tendenci opět pozorovat na modelu minimálního podélného rozměru, kdy klín vyvozuje tah ve vrchní části tělesa, a tedy deformací vzniká v spodní trhlíně tlakové napětí, které trhlínu uzavírá.

Pro znázornění rozdílů na intervalu $\langle 0,1; 0,4 \rangle$ byly pro tento interval závislosti polynomicky vyjádřeny. Pro trhlinu 1:

$$B_1(\alpha_1)_{S/W=4} = -3670,3\alpha^4 + 2760,6\alpha^3 - 788,73\alpha^2 + 79,914\alpha - 2,838;$$

$$R^2 = 0,9999$$

$$B_1(\alpha_1)_{S/W=3} = -1891,1\alpha^4 + 1396,1\alpha^3 - 384,23\alpha^2 + 34,101\alpha - 0,0932;$$

$$R^2 = 0,9999$$

$$B_1(\alpha_1)_{S/W=2} = -80,052\alpha^4 - 1,5748\alpha^3 + 32,048\alpha^2 - 13,45\alpha + 2,7684;$$

$$R^2 = 0,9998$$

$$B_1(\alpha_1)_{S/W=1} = 1696,7\alpha^4 - 1361,3\alpha^3 + 423,09\alpha^2 - 54,538\alpha + 5,6259$$

$$R^2 = 0,9999.$$

Pro trhlinu 2 lze polynomicky závislost na intervalu vyčíslit:

$$B_1(\alpha_2)_{S/W=4} = 3855,7\alpha^4 - 2896,1\alpha^3 + 832,78\alpha^2 - 87,675\alpha + 6,199;$$

$$R^2 = 0,9999$$

$$B_1(\alpha_1)_{S/W=3} = 2105,9\alpha^4 - 1569,6\alpha^3 + 446,75\alpha^2 - 45,693\alpha + 3,7036;$$

$$R^2 = 0,9999$$

$$B_1(\alpha_1)_{S/W=2} = 326,56\alpha^4 - 210,86\alpha^3 + 48,019\alpha^2 - 1,6755\alpha + 1,1339;$$

$$R^2 = 0,9999$$

$$B_1(\alpha_1)_{S/W=1} = -1324,5\alpha^4 + 1042,1\alpha^3 - 329,63\alpha^2 + 42,534\alpha - 1,0108;$$

$$R^2 = 0,9999.$$

Z polynomů je jasně viditelná závislost napětí v trhlínách pro jednotlivé rozpětí. Koeficienty vystihující závislost mají řádově obdobné hodnoty pro obě trhliny, ale opačného smyslu.

Parametry B_2 **Tabulka 8:** Výsledné hodnoty parametrů B_2 pro trhlinu 1 z numerického modelování

$\alpha_1 \backslash S/W$	4	3	2	1
0,10	4,948	-2,791	-1,284	-0,779
0,15	0,745	-12,469	-1,149	-0,569
0,20	0,177	1,719	-1,153	-0,355
0,25	0,010	0,410	-1,151	-0,150
0,30	-0,033	0,121	-0,980	0,024
0,35	-0,031	0,036	-0,814	0,141
0,40	-0,016	0,013	-0,678	0,176
0,45	-0,004	0,007	-0,610	0,127
0,50	0,001	0,002	-0,877	0,033

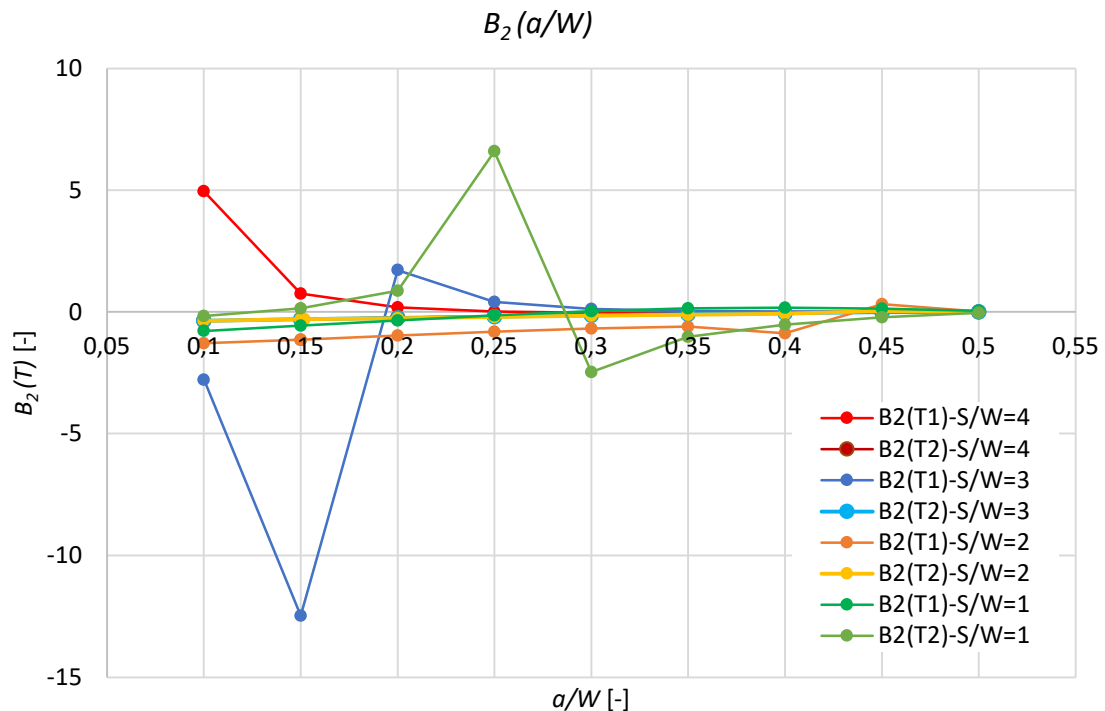
Tabulka 9: Výsledné hodnoty parametrů B_2 pro trhlinu 2 z numerického modelování

$\alpha_1 \backslash S/W$	4	3	2	1
0,10	-0,362	-0,362	-0,358	-0,172
0,15	-0,304	-0,308	-0,308	0,150
0,20	-0,243	-0,252	-0,306	0,870
0,25	-0,183	-0,195	-0,307	6,594
0,30	-0,126	-0,140	-0,258	-2,470
0,35	-0,076	-0,090	-0,209	-1,031
0,40	-0,038	-0,049	-0,161	-0,523
0,45	-0,013	-0,020	-0,115	-0,222
0,50	-0,002	-0,003	-0,075	-0,039

Z výsledných hodnot je viditelná snaha trhlín ponechávat si minimum hodnot a tedy, aby T – napětí zůstávalo v záporných (tlakových) hodnotách. U všech rozměrů má průběh tendenci růstu z hodnot záporných do kladných. U trhliny 1 se jedná o průběh připomínající logaritmickou křivku, u trhliny 2 spíše lineární závislost. Parametr B_2 však není funkcí pouze T -napětí, ale jeho poměru k faktoru intenzity napětí. Proto průběh funkce nepřipomíná přímo průběh T -napětí, jak je tomu u parametru B_1 . Výchyly se můžou objevit v případě, že dojde k výrazné změně poměru, tedy K dosáhne minima a T -napětí naopak maxima. Může to docílit výsledky až desetkrát převyšující množinu ostatních a s nepravidelným průběhem funkce.

Největší výchylky je dosaženo u poměru $S/W=3$, kdy nastává přechod působícího napětí z kladných hodnot do záporných, dosahuje tedy minimální hodnotu a při $\alpha=0,15$ dosahuje minima poměru, tedy maximální záporné hodnoty funkce obou napětí a následně relativně nízké hodnoty tlakového napětí kolmo na směr růstu, a tedy maxima kladné hodnoty poměru. U poměru $S/W=4$ je výrazný nepoměr v počátku, kdy působí T-napětí největší stabilitu trhliny, a tedy dosahuje maximální záporné hodnoty a součinitel intenzity napětí naopak vyvoluje minima důsledkem minimální délky trhliny.

U trhliny 2 lze chování vyhodnotit obdobně. Všechny poměry si v tomto případě drží hodnoty v záporných mezích. Jedinou výjimkou je model nejmenších rozměrů, u kterého na intervalu $\alpha \in <0,15;0,25>$ dosahuje T-napětí relativně vysokých hodnot tlakového napětí, a naopak napětí působící na růst trhliny se mění z tahového na tlakové a dosahuje svého minima. Hodnota pro $\alpha=0,25$ dosahuje maxima pro všechny stavy trhlin.



Obrázek 33: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro současný růst trhlin pro modifikovaný štípací test

Pro matematické vyčíslení závislosti byly použity části s relativně ustálenými hodnotami. Vzhledem na dostatečnou přesnost byly použity polynomy 4. stupně.

Pro trhlinu 1 lze polynomicke závislost vyčísliť:

$$B_2(\alpha_1)_{S/W=4} = 364,96\alpha^4 - 557,98\alpha^3 + 314,71\alpha^2 - 77,41\alpha + 6,9686;$$

$$R^2 = 0,9979$$

$$B_2(\alpha_1)_{S/W=3} = 426,9\alpha^4 - 725,74\alpha^3 + 461,38\alpha^2 - 130,21\alpha + 13,797;$$

$$R^2 = 0,9998$$

$$B_2(\alpha_1)_{S/W=2} = 20,12\alpha^4 - 63,165\alpha^3 + 32,88\alpha^2 - 2,7186\alpha - 1,2799;$$

$$R^2 = 1$$

$$B_2(\alpha_1)_{S/W=1} = 54,193\alpha^4 - 85,453\alpha^3 + 35,511\alpha^2 - 1,2555\alpha - 0,9259;$$

$$R^2 = 0,9997$$

Pro trhlinu 2 lze polynomicke závislost vyčísliť:

$$B_2(\alpha_2)_{S/W=4} = 3,2457\alpha^4 - 8,0413\alpha^3 + 3,9517\alpha^2 + 0,5157\alpha - 0,4453;$$

$$R^2 = 1$$

$$B_2(\alpha_2)_{S/W=3} = -0,4613\alpha^4 - 3,2779\alpha^3 + 2,1485\alpha^2 + 0,6956\alpha - 0,4497;$$

$$R^2 = 1$$

$$B_2(\alpha_2)_{S/W=2} = -68,062\alpha^4 + 75,737\alpha^3 - 29\alpha^2 + 5,4534\alpha - 0,6892;$$

$$R^2 = 0,9831$$

$$B_2(\alpha_2)_{S/W=1} = 3,2457\alpha^4 - 8,0413\alpha^3 + 3,9517\alpha^2 + 0,5157\alpha - 0,4453;$$

$$R^2 = 1.$$

U koeficientů není pozorovatelná podobnost u jednotlivých rozpětí pro trhliny 1 a 2, i když jsou hodnoty závislé na velikosti faktoru intenzity napětí. Hodnoty *T-napětí* se vzájemně pro jednotlivé trhliny neovlivňují.

Rovnající se hodnoty parametrů

Dalším z úkolů studie bylo nalezení stavu, při kterém se hodnoty faktorů intenzit napětí budou co nejvíc přibližovat. Využitím při hledání může být právě grafické znázornění a interpolační metoda. Při růstu obou trhlín tenhle případ nastane jenom při poměru $S/W = 2$.

Tabulka 10: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlín

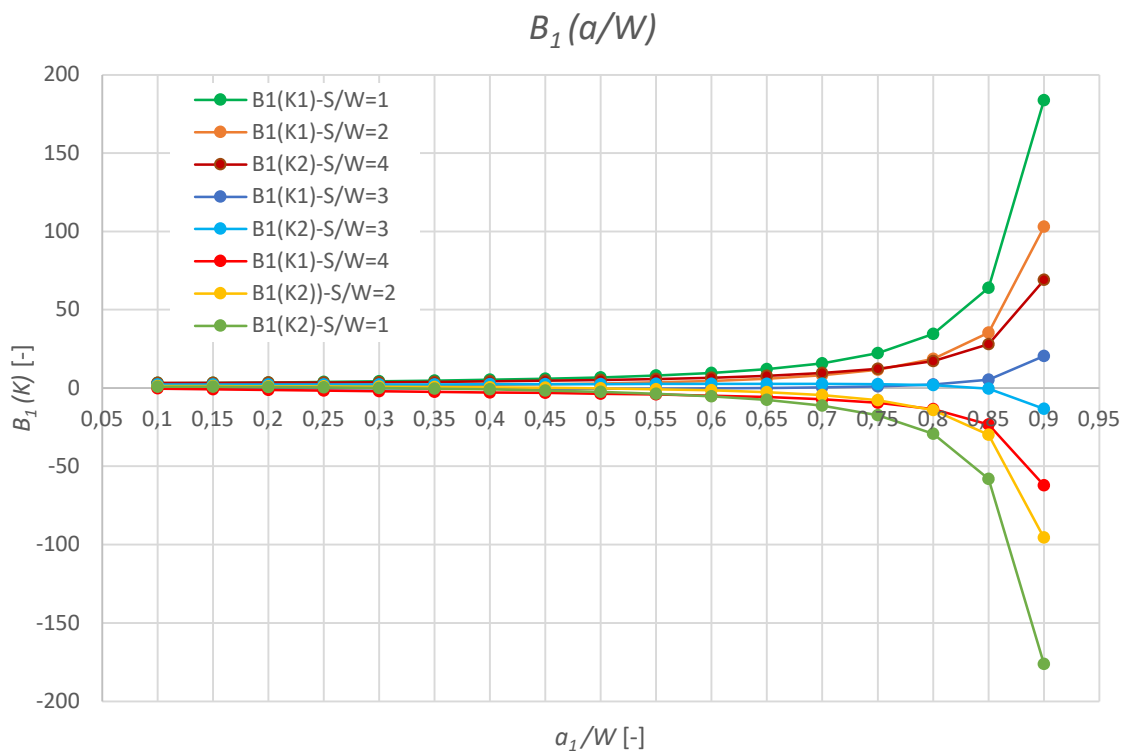
α_1	α_2	$K_1(\alpha_1)$	$K_2(\alpha_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,15	0,15	142,613	141,696	1,426	1,417
0,15	0,152	142,1252	142,710	1,421	1,427
0,15	0,151	142,370	142,2023	1,424	1,422

6.4.2. Růst trhliny 1 za konstantní délky trhliny 2

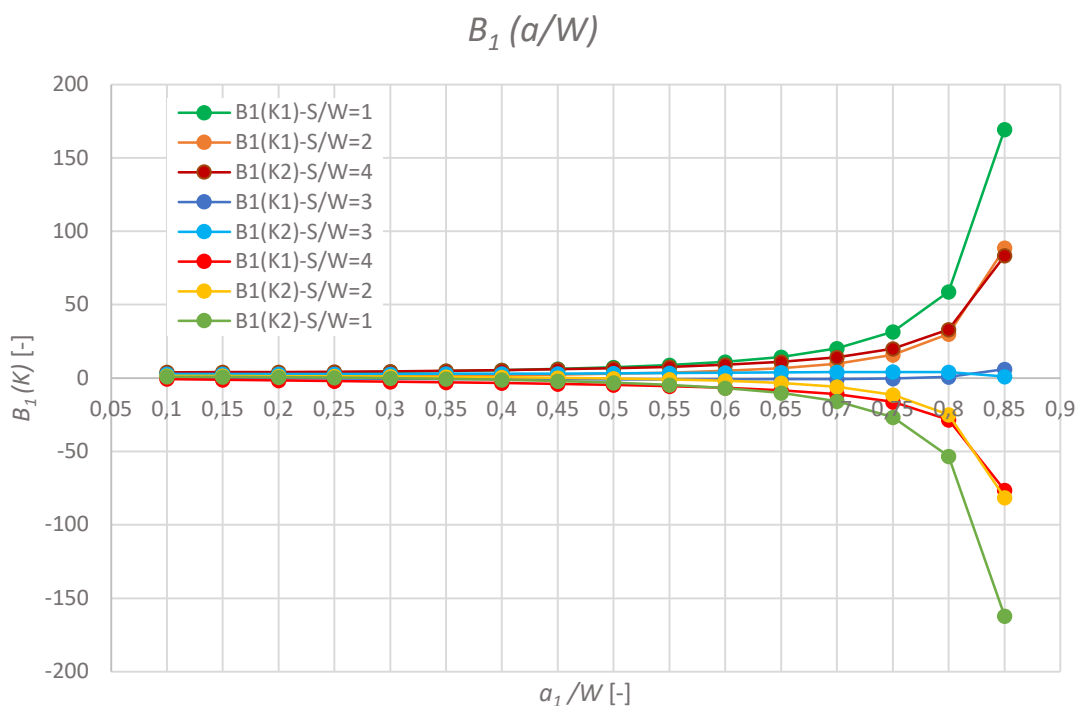
V druhé části bude sledováno hodnot koeficientů při různých konstantních délkách vrchní trhliny za zvětšující se délky druhé trhliny. Zatížení a geometrie modelu zůstává zachováno. Podle poměru konstantní trhliny je možno dosahovat maximální délky tak, aby byl pokaždé zachován maximální součet poměrů $\alpha_1 + \alpha_2 = 1,0$.

V grafickém znázornění výsledků bude vyjádřena závislost parametrů v souvislosti s trhlinou rostoucí délky. Numerické výsledky budou shrnuté v závěrečné práci.

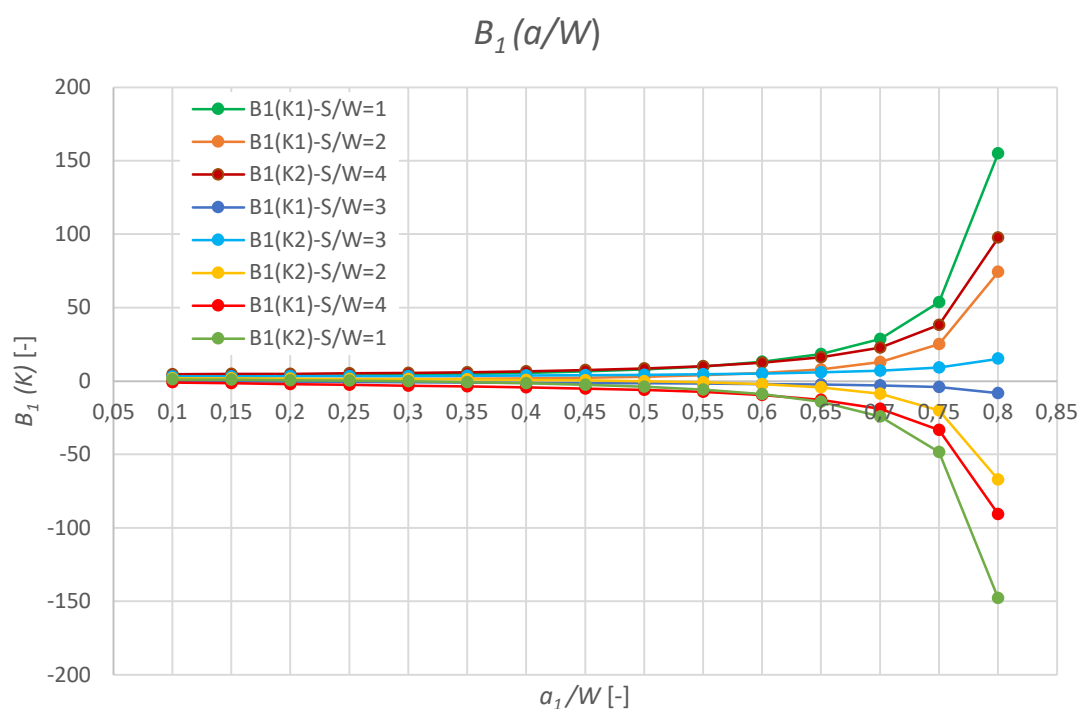
Parametry B_1



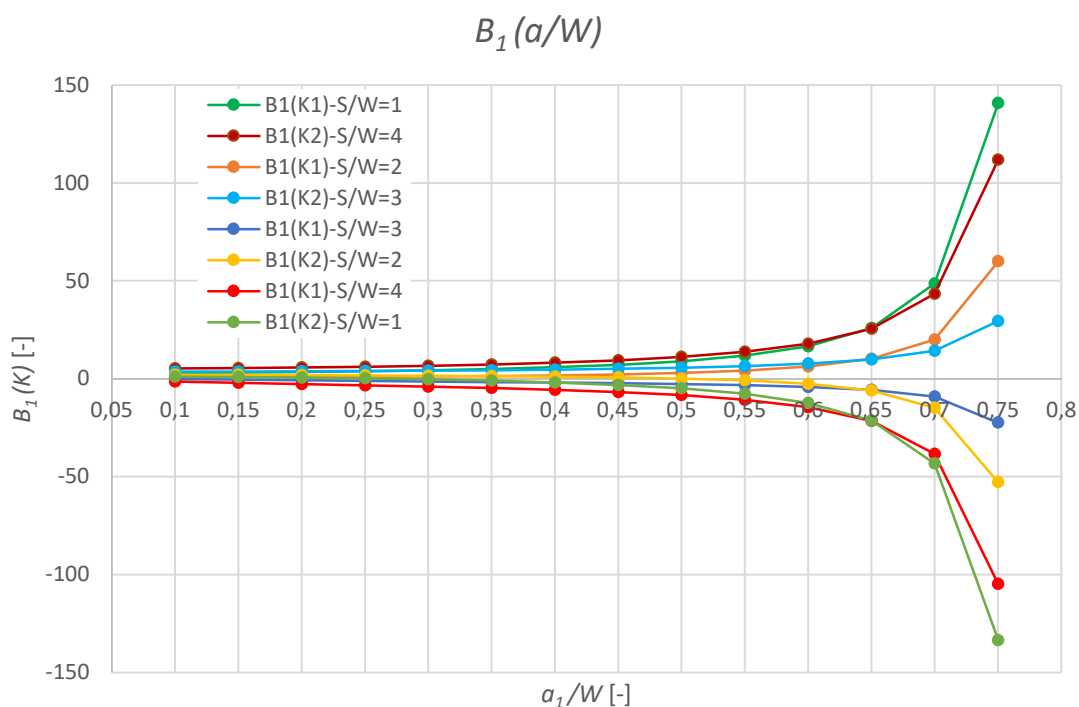
Obrázek 34: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,1$



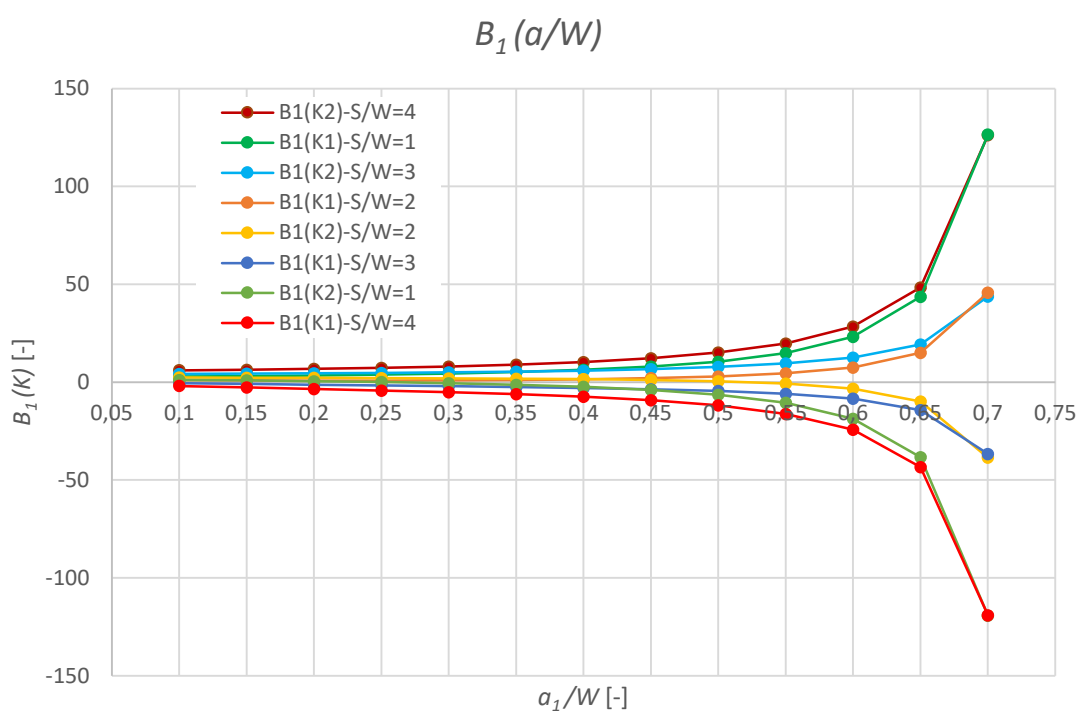
Obrázek 35: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,15$



Obrázek 36: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,20$



Obrázek 37: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2;
 $\alpha_2=0,25$



Obrázek 38: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2;
 $\alpha_2=0,30$

U všech případů je z průběhu křivek v závislosti na délce trhliny 1 zřejmá podobnost. Obecně je možno pozorovat, že pro každé rozpětí platí, že napětí ve vrcholu jedné trhliny roste stejnou tendencí jako klesá ve vrcholu druhé. To znamená, že síly od zatížení mají sklon působit pozitivně na podporu jedné trhliny při pokračování v růstu stejně velký jako u druhé pro zamezení nabírání na délce. Demonstruje to taky přibližně rovnající se odklon obou křivek pro jednotlivé rozměry těles – jednou k rostoucím hodnotám tahového a u druhé tlakového napětí. To rozhoduje, která trhlina se bude šířit a která naopak uzavírat u kterých případů.

Největší změnu lze docílit u rozpětí trojnásobně větším jako je výška tělesa a to u největších délek trhliny 2. Lze zde pozorovat změnu z působícího tahového napětí v trhlíně horní pro nejmenší konstantní délky ($\alpha_2=0,1$ a $0,2$) až po tlakové napětí pro délky větší. Pokud se však vyšetří celý průběh růstu, výsledky ukazují na příznivější podmínky pro růst trhliny na spodní části tělesa v celém průběhu, i když výraznější hodnoty v konečných fázích růstu mohou naznačovat jinak. Souvisí to s vysokým poměrem rozpětí k výšce a deformaci tělesa připomínající tah za ohybu. U ostatních variací nedochází k podobné změně působících napětí. Větší odchylky mezi parametry jednotlivých rozpětí lze pozorovat výrazněji až ve vrchních hodnotách intervalu poměrů α . Právě z této části lze usoudit, že minima koncentrace napětí dosahuje model tělesa s právě už zmíněnými rozměry. Maxima jak kladných, tak i záporných hodnot je dosaženo u modelu s poměrem $S/W=1$.

Pokud však porovnáme hodnoty koeficientů pro jednotlivé délky, jejichž součet je však stejný (například $\alpha_1=0,5$ a $\alpha_2=0,1$ a $\alpha_1=0,45$ a $\alpha_2=0,15$), tedy zanechávají rovnající se nepoškozenou, celistvou délkou tělesa, zjistíme, že i s rostoucím poměrem hodnot se jejich rozdíl nezmění, pokud je délka mezi nimi zachována (v uvažovaném příkladě je tedy rozdíl hodnot minimálně odlišný jako bude při $\alpha_1=0,45$ a $\alpha_2=0,15$ a $\alpha_1=0,40$ a $\alpha_2=0,20$). Nejjednodušeji je tenhle princip pozorovat u maximálních hodnot, u kterých lze pozorovat nejmenší odchylky rozdílů.

Orientujeme-li však pozornost na polohu trhlín, pro trhlínu 1 je možno definovat, že se zvětšujícím se podélným rozměrem, a tedy i rozpětím podpor, stoupá v trhlíně tlakové napětí a klesá tendence k šíření trhliny. Opačný stav lze pozorovat při trhlíně spodní, kde se zvyšující se délkou tělesa je v spodní části vyvozováno zvyšující se kladně orientované napětí, tedy tahové. Je to možno vysvětlit s výraznějším vlivem podporových sil, tedy reakcí, na deformaci než sil od zatěžování. Rovněž tady působí mrtvá tíha obdobně jako u třibodového ohybu. Tyto závislosti si lze jednoduše představit pomocí předpokládané deformace. K šíření trhliny vrchní dojde s největší pravděpodobností při nejmenších rozpětích, tedy $S/W=1$ a $S/W=2$.

I když je možno pozorovat určitý rozdíl v dosahovaných napětích, nenastává tato změna radikálně ani výrazně. Polynomická závislost je proto vyjádřena jenom pro největší délku trhliny a maxima hodnot a jenom pro rostoucí trhlínu 1.

Znázornění rozdílu průběhů bylo vyčísleno na intervalu $\alpha_1 \in <0,1 ; 0,5>$:

$$B_1(\alpha_1)_{S/W=4} = 42,49\alpha^4 - 84,214\alpha^3 + 53,608\alpha^2 - 20,972\alpha + 1,3117;$$

$$R^2 = 1$$

$$B_1(\alpha_1)_{S/W=3} = 73,509\alpha^4 - 104,2\alpha^3 + 61,166\alpha^2 - 18,565\alpha + 2,0283;$$

$$R^2 = 0,9999$$

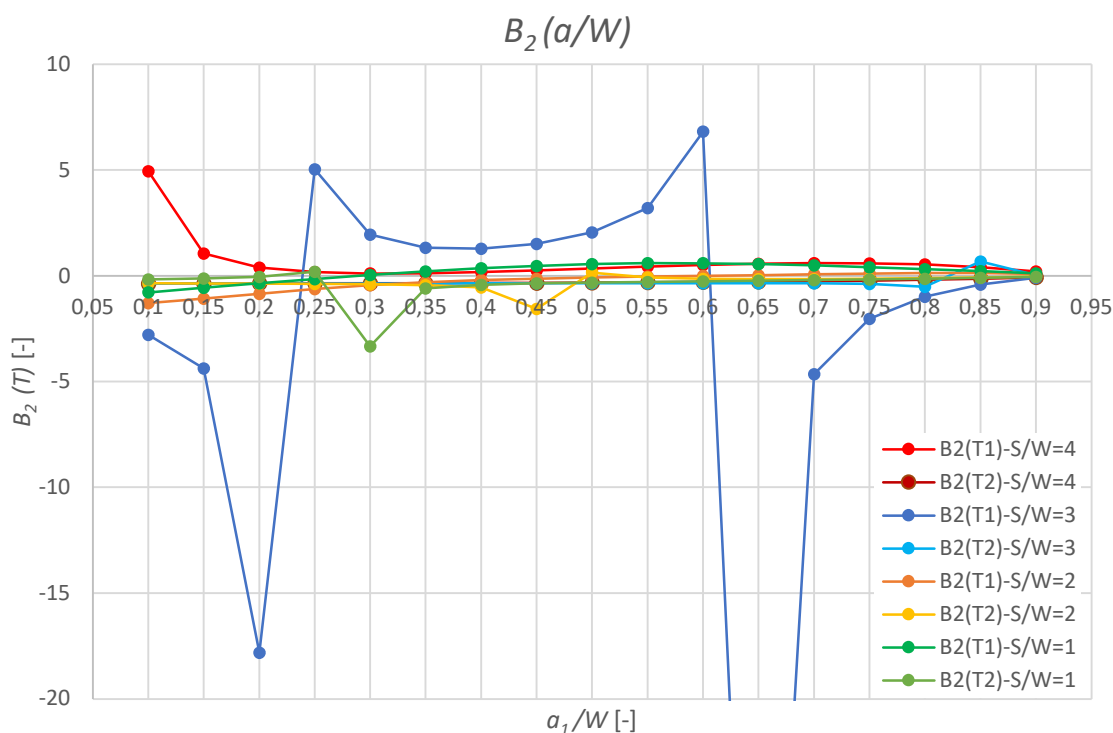
$$B_1(\alpha_1)_{S/W=2} = 105,11\alpha^4 - 124,71\alpha^3 + 68,635\alpha^2 - 16,063\alpha + 2,7683;$$

$$R^2 = 0,9999$$

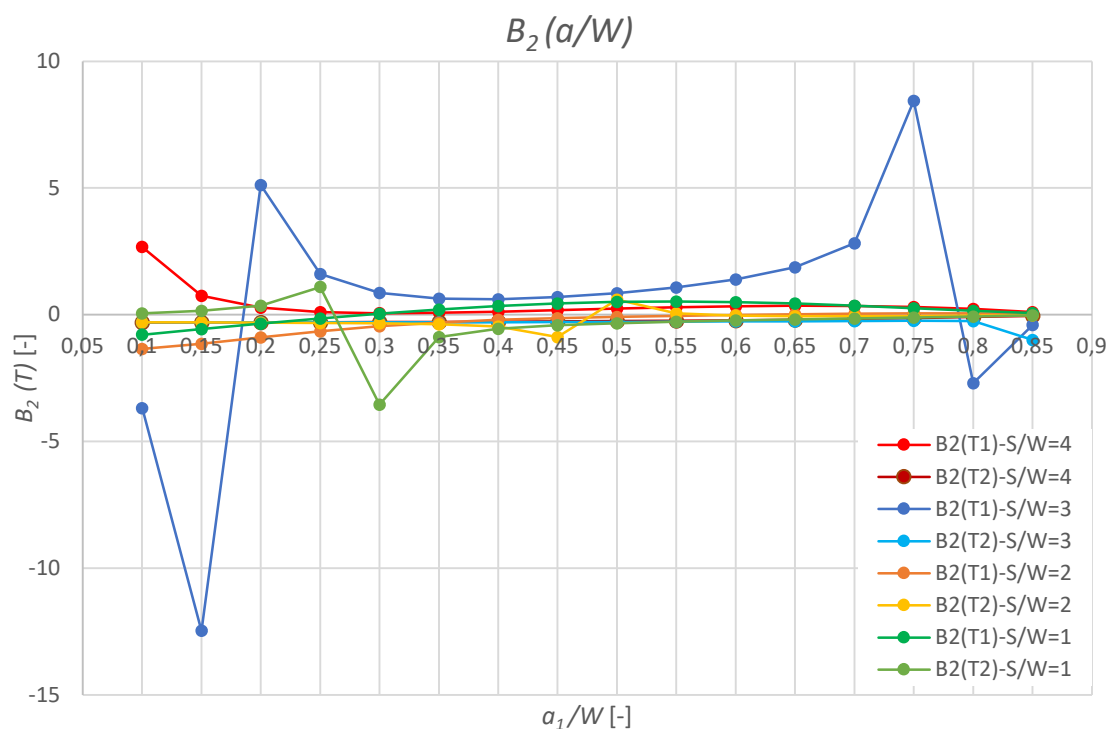
$$B_1(\alpha_1)_{S/W=1} = 150,75\alpha^4 - 167,9\alpha^3 + 82,751\alpha^2 - 12,147\alpha + 3,7455;$$

$$R^2 = 1.$$

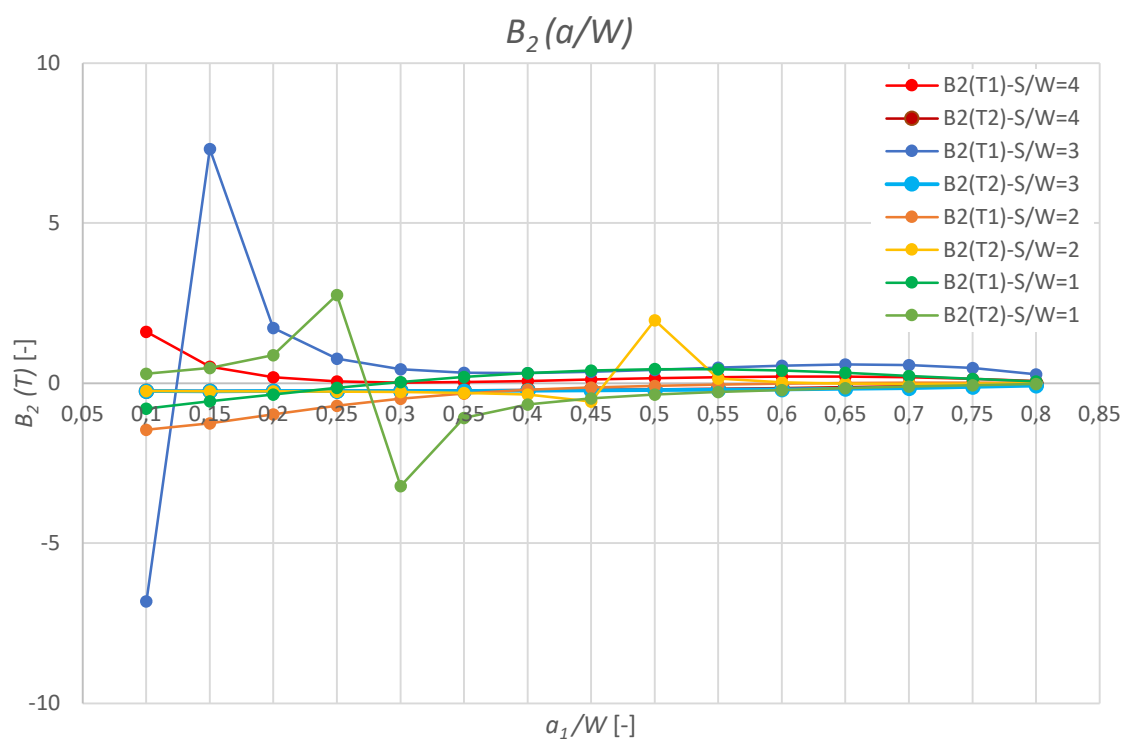
Parametry B_2



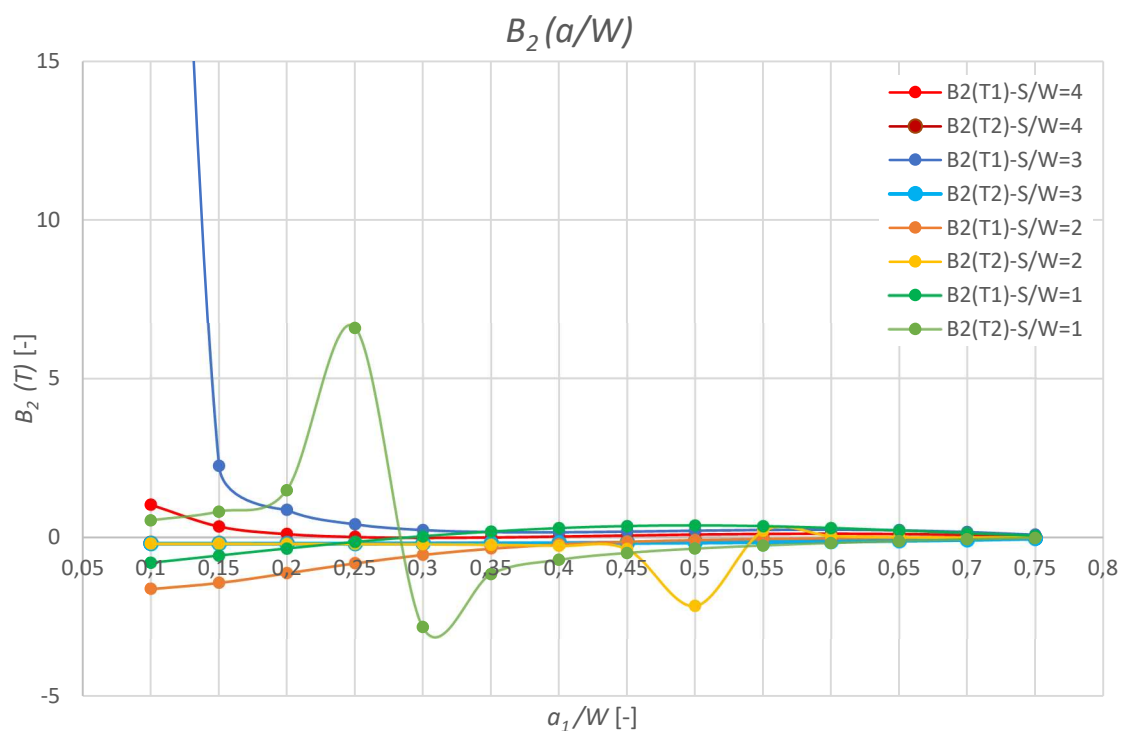
Obrázek 39: Grafické znázornění parametru $B_2(a)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,10$



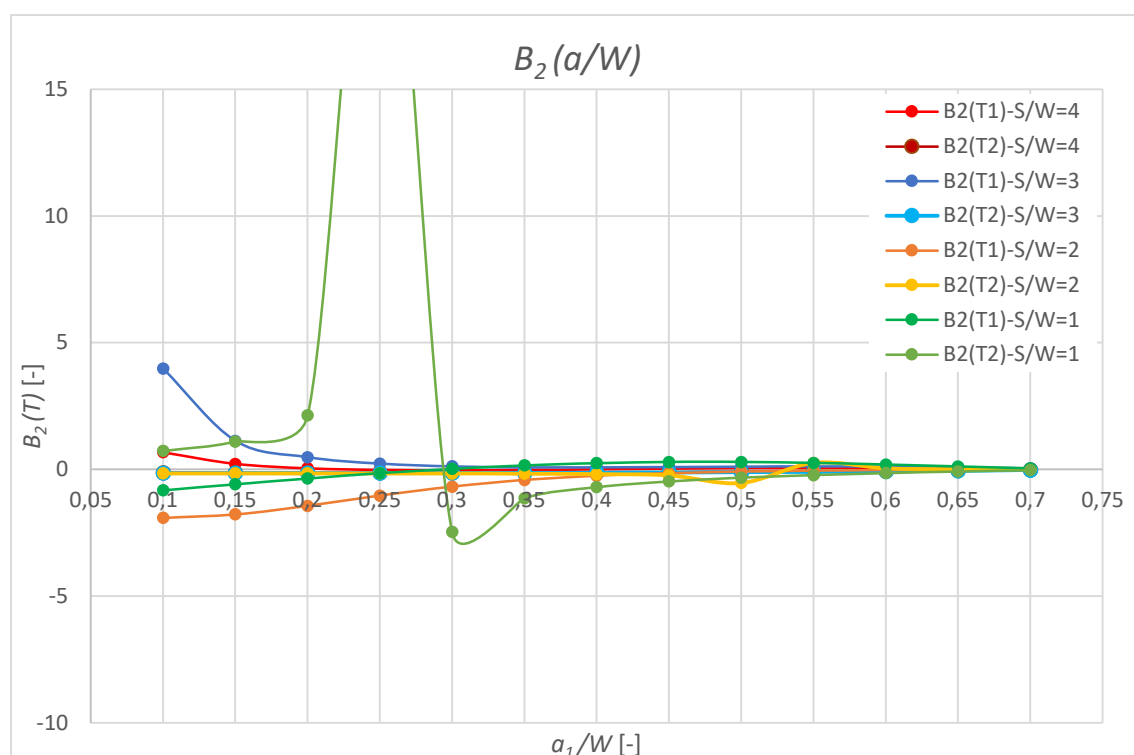
Obrázek 40: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,15$



Obrázek 41: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,20$



Obrázek 42: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,25$



Obrázek 43: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,30$

Z grafického vynesení výsledků je zřejmé, že ve většině případů si obě trhliny snaží udržet minima *T-napětí*, a tedy směrovou stabilitu. Největší výkyvy je pro všechny konstantní délky možno pozorovat u funkce rozpětí $S/W=3$ pro trhlinu 1. U konstantní délky $\alpha_2=0,1$ je výchylka v počátku způsobená změnou napětí ve vrcholu z tahového na tlakové, tedy klesání hodnot za poměrně vysokého *T-napětí*. Pak dosáhne kolmo působící napětí minima tlaku. V další fázi přechází zpět do tahového působení a rovněž se zvyšuje i stabilita, tedy tahové *T-napětí*, což opět způsobí skok v průběhu. Při $\alpha_1=0,65$ k dosažení maximálního poměru intenzity tahového napětí k rostoucímu tlakovému *T-napětí*, převyšující ostatní hodnoty v desetinásobcích. Obdobný jev se vyskytuje také u poměru $\alpha_2=0,2$ a $\alpha_1=0,15$, kdy opět působící napětí prochází do tlakové tendence. Výjimku vykazuje i poměr $S/W=1$ a $S/W=2$. Překvapivě se však jedná o výkyvy u trhliny se stabilní délkou. Rozkmit se zpravidla vyskytuje u rozměrově menšího modelu na intervalu $\alpha_1 \in <0,2;0,35>$ u všech konstantních délek trhliny 2, kdy dosáhne nejprve maxima kladné a následně záporné hodnoty. U většího rozpětí dochází k změně v průběhu nejprve u $\alpha_1 \in <0,4;0,55>$ u $\alpha_2=0,1$ a $0,2$ a $0,3$ a následně při $\alpha_1 \in <0,45;0,60>$ u větších konstantních délek trhliny 2, Tendence je tedy však opačná, nejprve je dosažena maximální záporná a následně kladná hodnota.

Matematická závislost byla opět vyčíslena jenom pro nejmenší konstantní délku a rostoucí trhlinu. Pro omezení vlivu výkyvů nebyly do výpočtu zahrnovány hodnoty výrazně se vymykající a negativně ovlivňující průběh křivky.

Výsledné polynomy:

$$B_2(\alpha_1)_{S/W=4} = 2,9063\alpha^4 - 21,61\alpha^3 + 28,531\alpha^2 - 11,941\alpha + 1,6945;$$

$$R^2 = 0,9992$$

$$B_2(\alpha_1)_{S/W=3} = -3848,6\alpha^5 + 11731\alpha^4 - 13737\alpha^3 + 7696,1\alpha^2 - 2063\alpha + 213,54;$$

$$R^2 = 0,9777 \text{ (pro zachování přibližně stejné přesnosti je použito polynomu 5týho stupně)}$$

$$B_2(\alpha_1)_{S/W=2} = -2,8245\alpha^4 + 9,4161\alpha^3 - 12,731\alpha^2 + 8,275\alpha - 2,0311;$$

$$R^2 = 0,9971$$

$$B_2(\alpha_1)_{S/W=1} = 12,607\alpha^4 - 25,46\alpha^3 + 11,811\alpha^2 + 2,1384\alpha - 1,0801;$$

$$R^2 = 0,9998.$$

Rovnající se hodnoty parametrů

Výsledky a grafické znázornění byly opět použity k nalezení blízkých hodnot součinitelů intenzity napětí a z nich vycházejících parametrů *B1*, Výsledky jsou zobrazeny spolu s výsledky interpolace, která vedla k jejich nalezení.

Hodnoty pro poměr $S/W=3$:

Tabulka 11: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,10$

α_1	α_2	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,80	0,1	247,917	148,796	2,479	1,488
0,78	0,1	180,039	188,309	1,800	1,883
0,781	0,1	182,933	186,724	1,829	1,867
0,782	0,1	185,873	185,103	1,859	1,851

Tabulka 12: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,15$

α_1	α_2	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,83	0,148	294,673	295,439	2,947	2,954
0,879	0,147	290,549	291,277	2,905	2,913
0,875	0,143	275,531	276,120	2,755	2,761
0,82	0,138	259,473	259,909	2,595	2,599

Hodnoty pro poměr $S/W=2$:

Tabulka 13: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,20$

α_1	α_2	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,275	0,2	131,059	132,958	1,311	1,330
0,28	0,2	132,226	131,319	1,322	1,313
0,277	0,2	131,519	132,306	1,315	1,323
0,278	0,2	131,750	131,978	1,318	1,320

Tabulka 14: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,25$

α_1	α_2	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,33	0,25	129,564	142,921	1,296	1,429
0,34	0,25	134,059	138,756	1,341	1,388
0,345	0,25	136,468	136,583	1,365	1,366

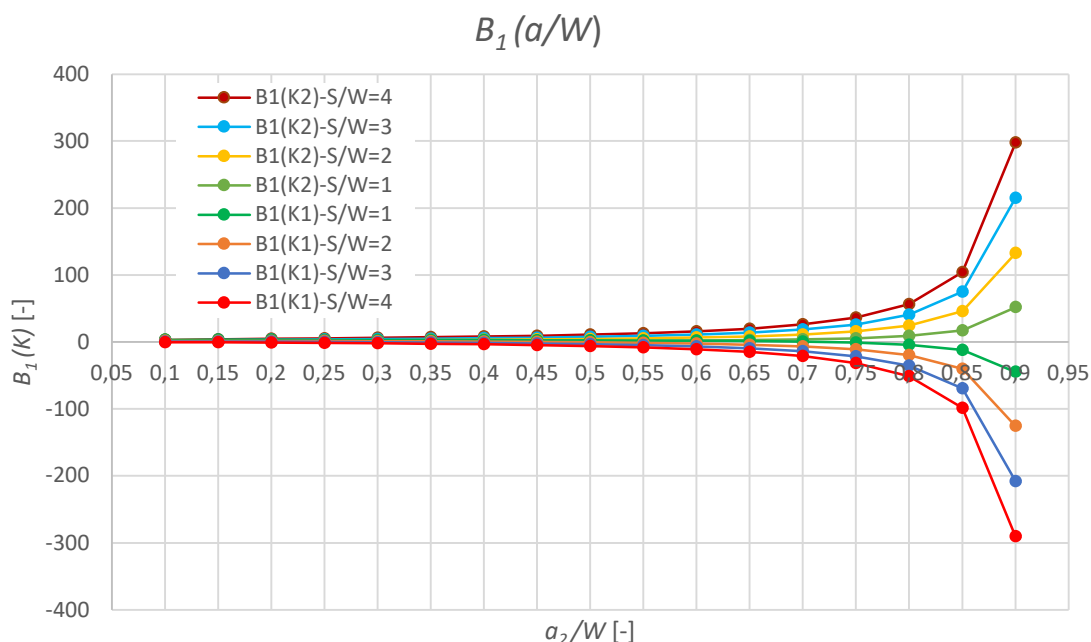
Tabulka 15: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,30$

α_1	α_2	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,40	0,30	145,984	148,330	1,460	1,483
0,402	0,3	147,690	147,075	1,477	1,471
0,41	0,31	148,302	152,019	1,483	1,520
0,42	0,32	151,011	156,139	1,510	1,561
0,42	0,315	154,675	150,442	1,547	1,504
0,42	0,317	153,232	152,691	1,532	1,527

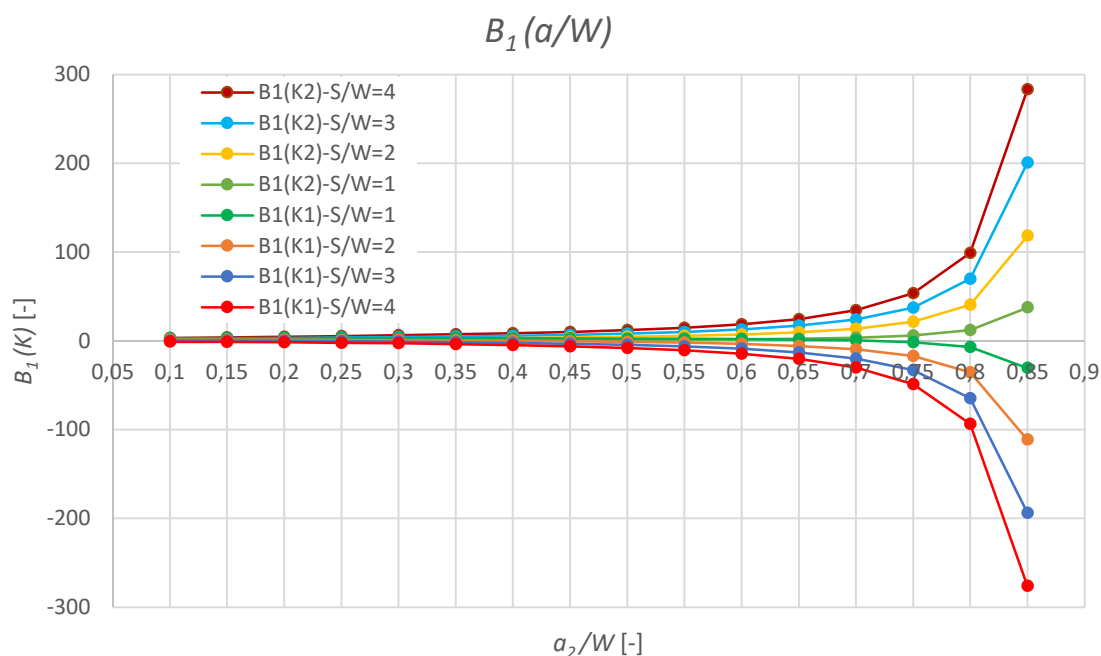
6.4.3. Růst trhliny 2 za konstantní délky trhliny 1

Následující část prezentuje případy opačný, kde je vyvozeno růstu trhliny v spodní části při zachování konstantní délky trhliny horní. Opět nedochází ke změně geometrie ani působícího zatížení.

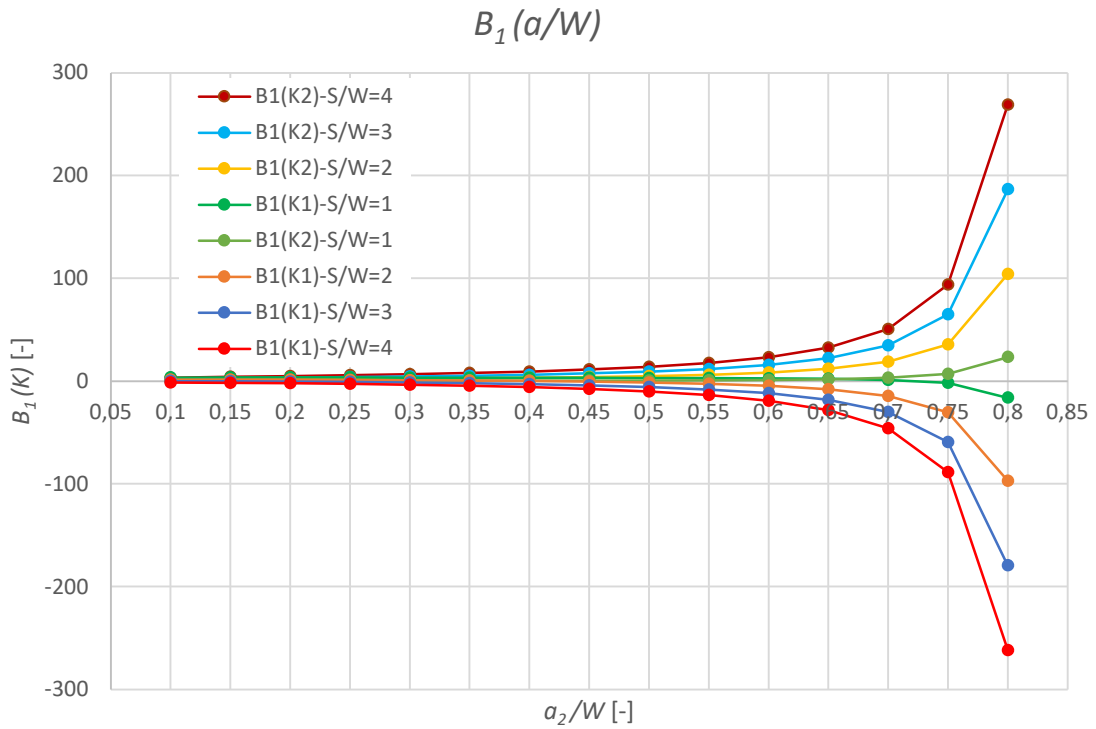
Parametry B_1



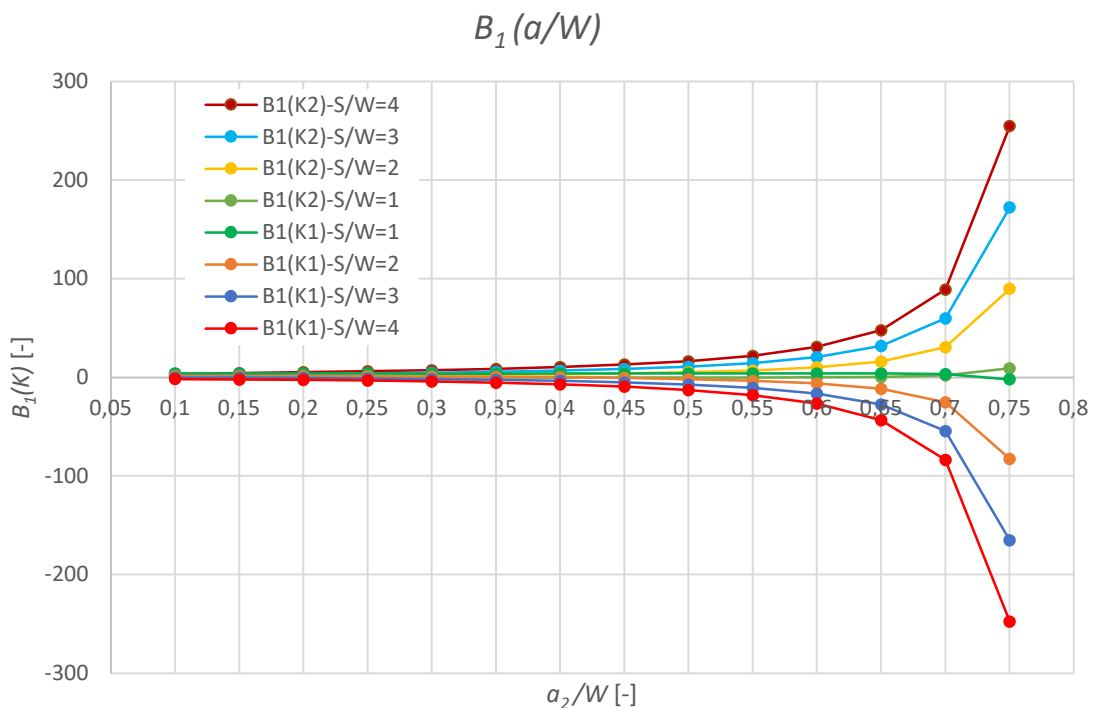
Obrázek 44: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,1$



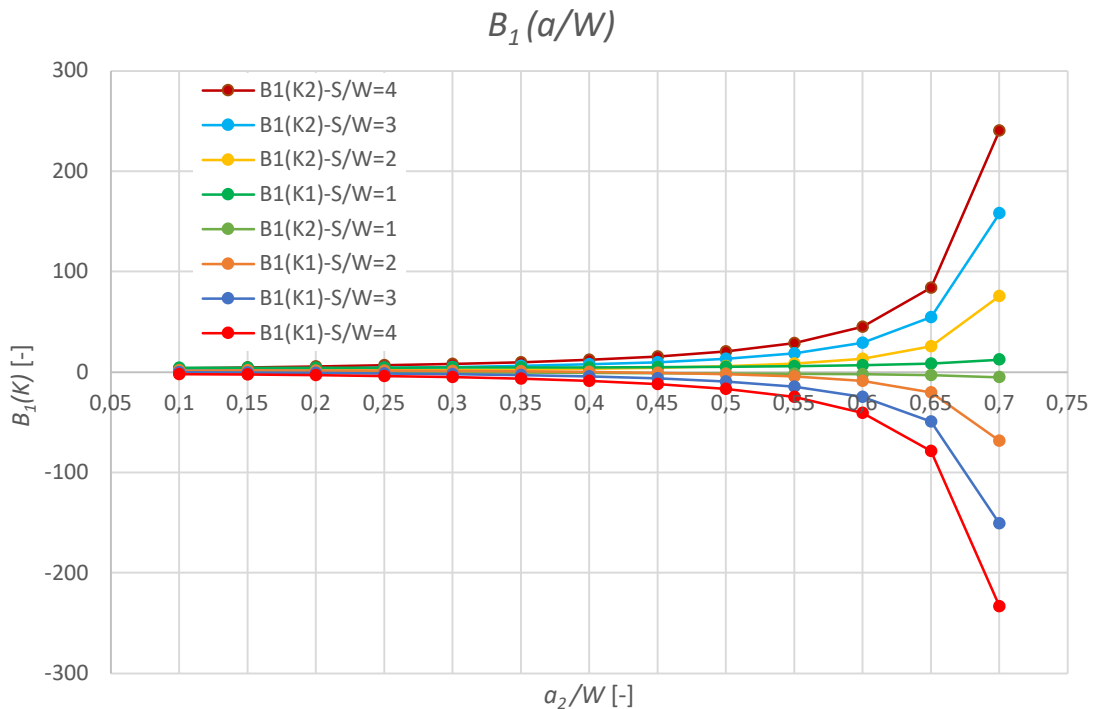
Obrázek 45: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,15$



Obrázek 46: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,20$



Obrázek 47: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,25$



Obrázek 48: Grafické znázornění parametru $B_1(a)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,30$

Podle grafického znázornění je opět pozorovatelná tendence zvyšování napětí k vyvození růstu jedné trhliny za stejnoměrného růstu napětí k uzavření trhliny druhé. Oproti předchozímu případu však nedochází k záměně orientace napětí pro jednotlivé trhliny. U nejmenšího poměru $S/W=1$ jsou opět vyvozeny podmínky působící pozitivně pro růst trhliny 1. Až s narůstající délkou spodní trhliny dojde k vyvození tahového napětí v jejím vrcholu pozitivního pro šíření. Ve spodní části tělesa je tedy nutno k růstu vyvození tahu, aby byl zabezpečený rozvoj trhliny 2. Pro jednodušší dosažení je tehdy zřejmé zvětšení rozteče podpor. Se zvětšujícím se rozpětím totiž stoupá vliv reakčních sil podpor a deformace tělesa se blíží deformaci při tříbodovém ohybu. Maxima hodnot napětí je tedy i na základě výsledků modelování dosaženo pokaždé při největším podélném rozměru tělesa. Minima napětí naopak dosahuje model tělesa, který jevil tendenci největšího koncentrace napětí při růstu trhliny v horní části tělesa, tedy s rozpětím $S/W=1$. Jediný model, u kterého napětí působilo pozitivně tak na růst trhliny horní v prvním zkoumaném případě, tak na růst dolní v tomto případě je při rozpětí $S/W=0,2$. I když je možno v počátcích růstu sledované trhliny pozorovat u některých konstantních délek nižší napětí jako u trhliny konstantní, již v počátku (tedy maximálně do poměru přibližně $\alpha=0,3$) dojde k zvýšení tahového napětí působícího k otevírání čel a vyšší podpoře růstu trhliny, která zvětšuje svůj rozměr.

Opět je u rozměrů trhlin zachovávajících stejnou neporušenou výšku možné pozorovat stejnoměrný rozdíl hodnot funkce. Rozdíl je v tom, že zatím co s rostoucí horní trhlinou se napětí se stejným rozdílem zvětšovalo, v tomhle případě naopak klesá. Zatím co u největších rozměrů tenhle rozdíl působící napětí zmenšuje, ale nemění její charakter, u nejmenšího rozměru je vidno změnu z tlakového napětí působícího ve vrcholu trhliny 1 na tahové a naopak.

Při porovnání velikosti hodnot pro rostoucí trhlinu, koncentrace napětí u růstu trhliny 2 převyšuje hodnoty při růstu trhliny 1 několikanásobně (přibližně 1,5krát při $S/W=2$ až třináásobně u $S/W=3$). Výjimkou je však už zmíněný model s poměrem $S/W=1$, kdy je naopak dosaženo hodnot zlomkových (řadově v desetinách až setinách) oproti koncentraci při růstu trhliny vrchní.

Polynomických závislostí bylo odvozeno opět jenom pro nejmenší délku konstantní trhliny, a tedy pro největší množství výsledných hodnot pro odvození a opět jenom pro trhlinu měnící se délky. Opět byl vybrán totožný interval tentokrát pro druhou trhlinu $\alpha_2 \in <0,1;0,5>$.

$$B_1(\alpha_2)_{S/W=4} = 52,351\alpha^4 + 11,927\alpha^3 - 16,965\alpha^2 + 17,201\alpha + 1,67;$$

$$R^2 = 1$$

$$B_1(\alpha_2)_{S/W=3} = 38,735\alpha^4 + 6,9966\alpha^3 - 11,084\alpha^2 + 11,74\alpha + 1,1629;$$

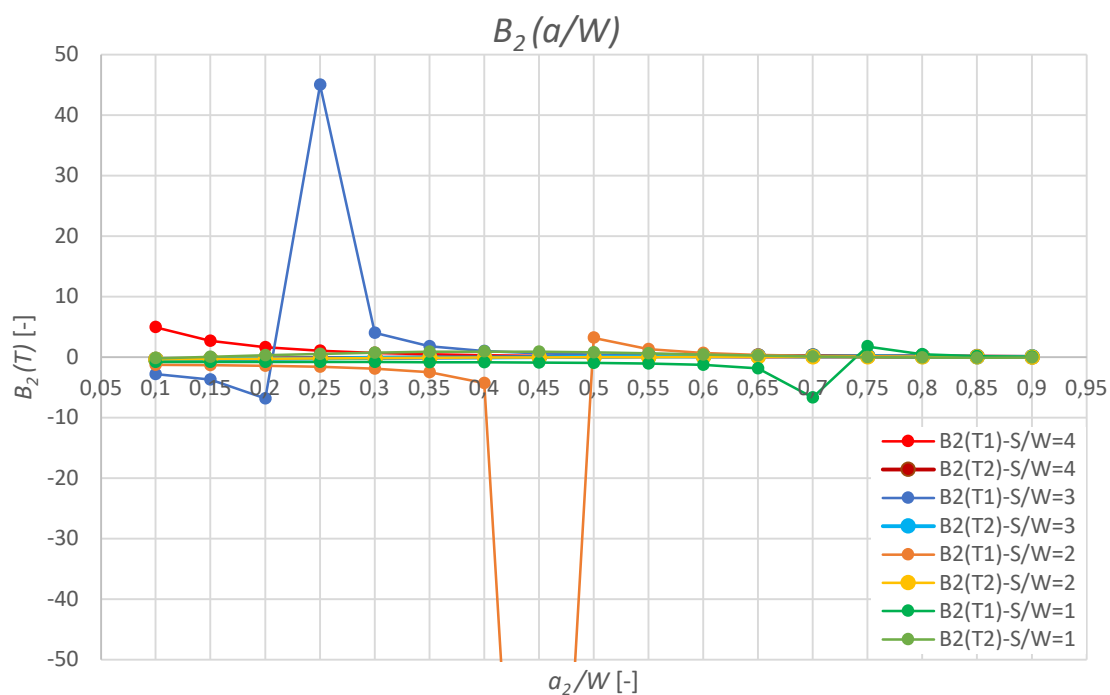
$$R^2 = 1$$

$$B_1(\alpha_2)_{S/W=2} = 25,077\alpha^4 + 2,7201\alpha^3 - 6,0459\alpha^2 + 6,5528\alpha + 0,6677;$$

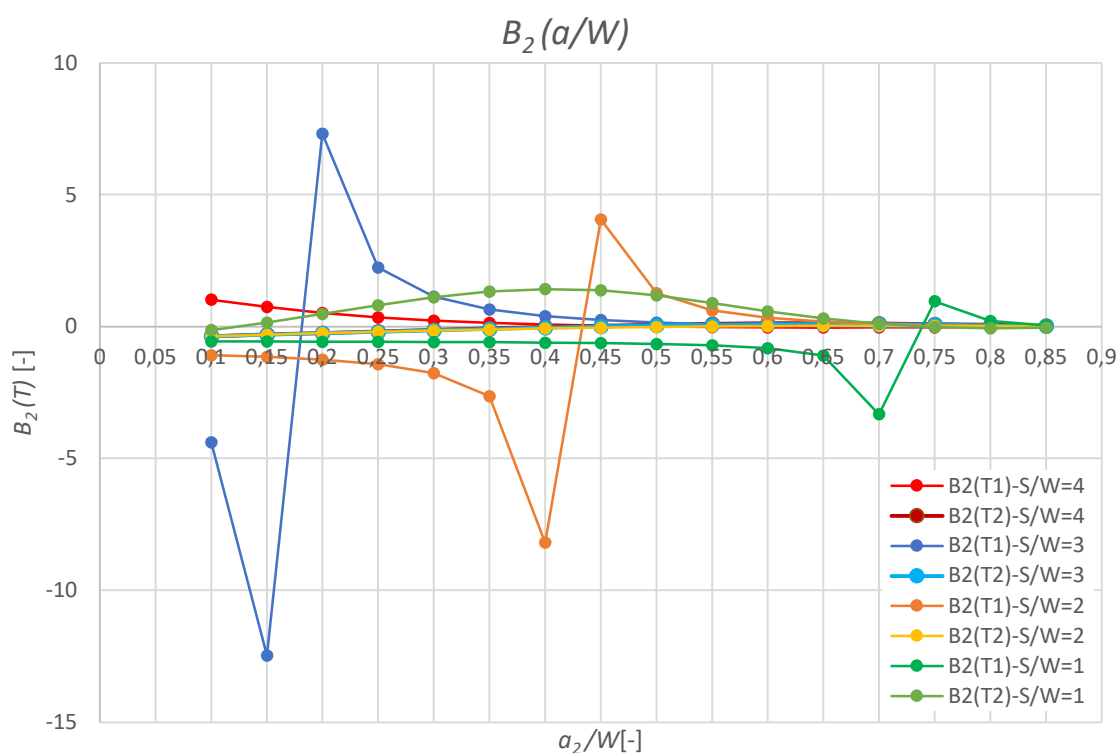
$$R^2 = 1$$

$$B_1(\alpha_2)_{S/W=1} = -1,7328\alpha^4 + 23,1\alpha^3 - 18,078\alpha^2 + 5,5078\alpha + 0,4682;$$

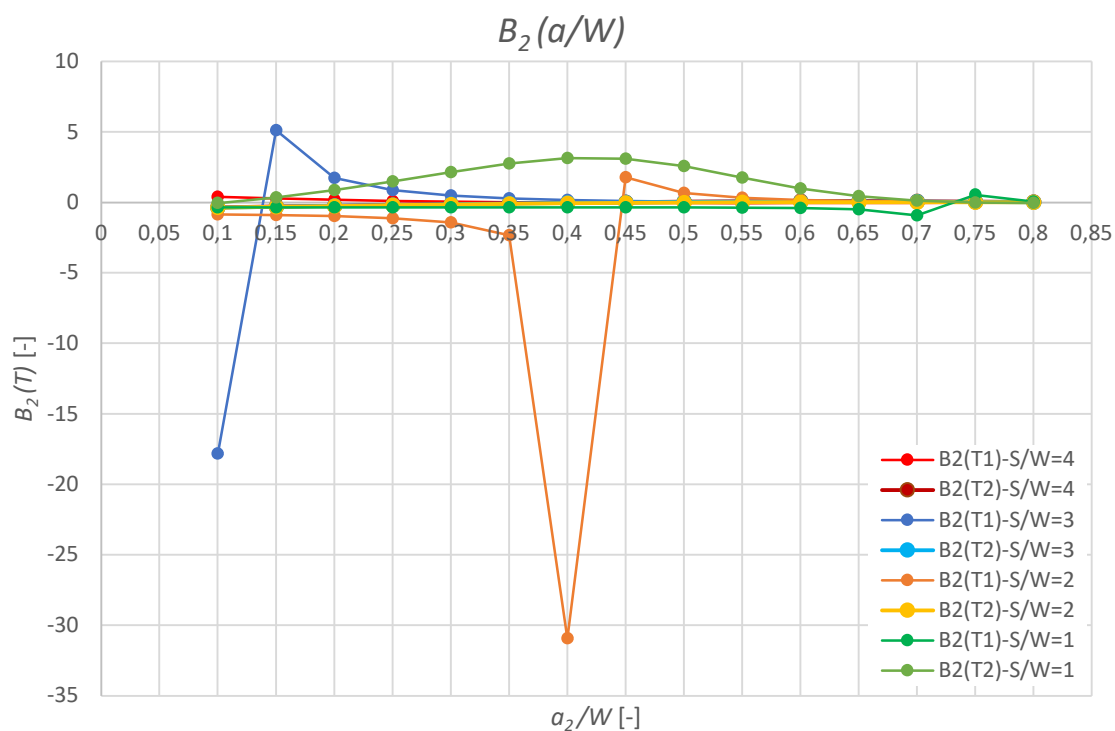
$$R^2 = 1.$$

Parametry B_2 

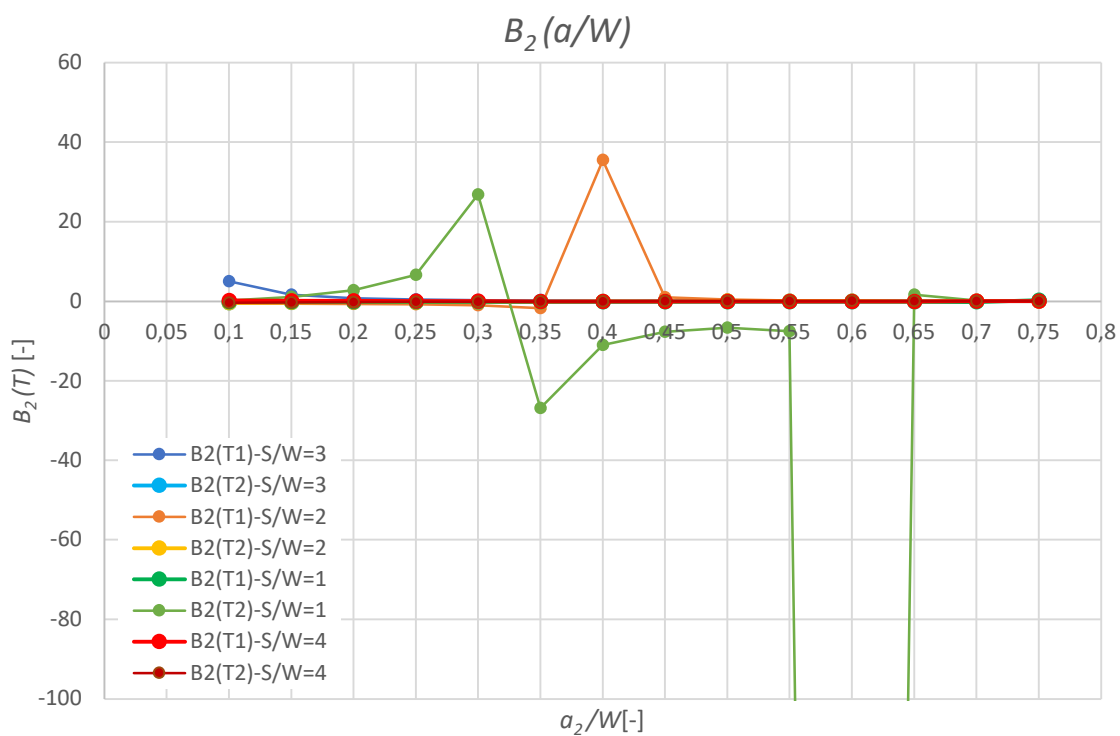
Obrázek 49: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,10$



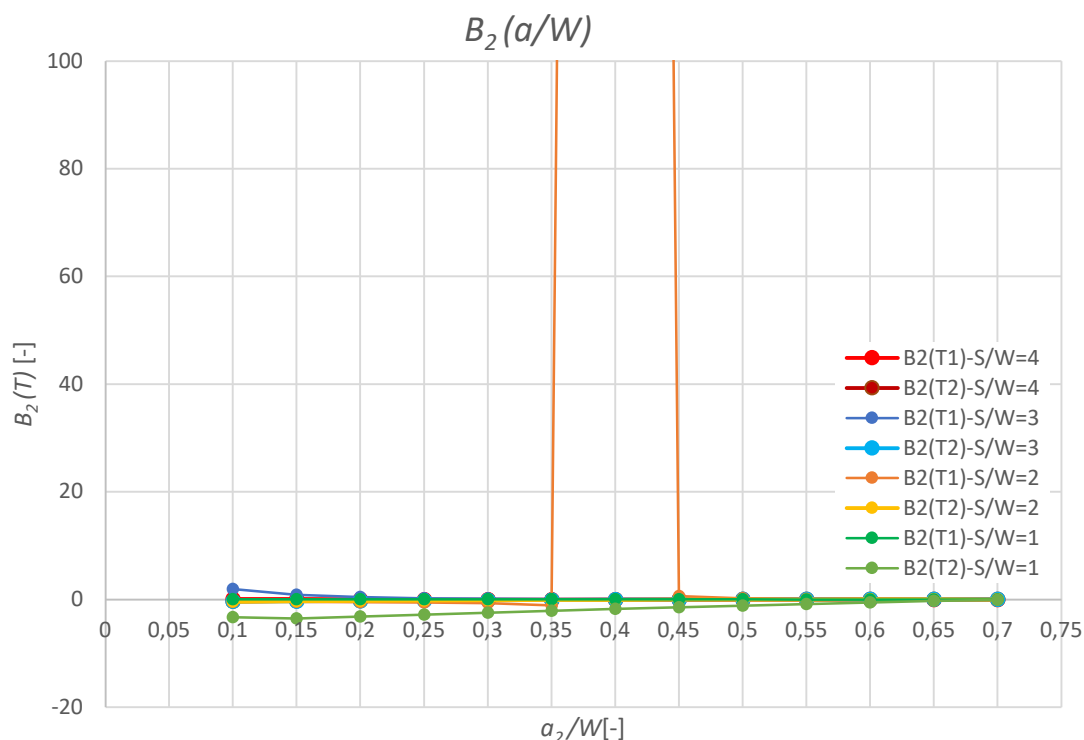
Obrázek 50: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,15$



Obrázek 51: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,20$



Obrázek 52: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,25$



Obrázek 53: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,30$

Z výsledků je zřejmé největšího nepoměru v případě trhliny 1 při poměru podpor k výšce $S/W=2$. Dochází opětovně k už zmíněnému případu. Napětí tahové, které ve vrcholu trhliny způsobovalo její růst, začíná klesat, protože roste trhlina 2. Mění tedy svoji tendenci na tlakovou a dosahuje při tom minimum hodnot. T -napětí se naopak mění z tlakového na tahové, ale jeho hodnoty neklesají stejnou rychlostí, tedy pořád jsou neúměrně vysoké. Vrcholu tedy parametr B_2 dosahuje na intervalu $\alpha_2 \in <0,4; 0,45>$.

U nejkratších délek konstantní trhliny, tedy $\alpha_1=0,1; 0,2$ a $0,3$ lze v počátku růstu trhliny 2 opět pozorovat výchylky u trhliny nerostoucí, tentokrát u modelu s velikostí podpor k výšce $S/W=3$. Dochází tady opět k změně účinků napětí ve vrcholu z tahu na tlak, ale napětí rovnoběžné si pořád udržuje vysokých záporných hodnot. Při poměru $S/W=1$ lze při $\alpha_1=0,1$ a $0,2$ pozorovat výraznou neúměrnost naopak v maximálních hodnotách. Na intervalu $\alpha_2 \in <0,65; 0,80>$ dojde k dosažení maximálních záporných a následně kladných hodnot. V modelu tohoto rozpětí dochází jako u jediného k dosažení výrazného minima i u rostoucí trhliny, které nastane při $\alpha_1=0,25$ a délce trhliny $\alpha_2=0,6$. T -napětí totiž dosahuje velice vysoké směrové nestability, tedy účinkuje vysoký tah. Faktor intenzity napětí je naopak v minimálních záporných hodnotách.

Vzhledem na největší množství hodnot byly opět sestaveny parametrické závislosti jenom pro nejmenší délku, tedy $\alpha_1=0,1$ a rostoucí trhlínu:

$$B_2(\alpha_2)_{S/W=4} = 1,0842\alpha^4 - 4,4428\alpha^3 + 3,2206\alpha^2 + 0,4062\alpha - 0,4266;$$

$$R^2 = 0,9993$$

$$B_2(\alpha_2)_{S/W=3} = 0,6796\alpha^4 - 3,2352\alpha^3 + 2,2999\alpha^2 + 0,5504\alpha - 0,4334;$$

$$R^2 = 0,9993$$

$$B_2(\alpha_2)_{S/W=2} = 0,2986\alpha^4 - 1,1906\alpha^3 + 0,2228\alpha^2 + 1,0578\alpha - 0,464;$$

$$R^2 = 0,9996$$

$$B_2(\alpha_2)_{S/W=1} = -72,732\alpha^5 + 209,94\alpha^4 - 208,92\alpha^3 + 79,383\alpha^2 - 7,6018\alpha - 0,007;$$

$$R^2 = 0,9995 \text{ (pro zachování přibližně stejné přesnosti je použito polynomu 5. stupně).}$$

Rovnající se hodnoty parametrů

V případě již zmíněných rozpětí docházelo k tendenci výměny účinku napětí z tlakového na tahové a naopak. Pokud tenhle případ nastal u obou trhlin, plyne z toho nutnost přibližujících se hodnot parametrů při dosažení rovnosti napětí ve vrcholech obou trhlin.

Hodnoty pro poměr $S/W=2$:

Tabulka 16: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,10$

α_1	α_2	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,10	0,15	163,5327	153,9477	1,635	1,539
0,10	0,20	149,9464	179,7063	1,499	1,797
0,10	0,156	159,840	159,513	1,598	1,595
0,10	0,1565	159,714	159,774	1,597	1,598

Tabulka 17: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,20$

α_1	α_2	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,20	0,15	137,199	129,156	1,372	1,292
0,20	0,20	122,896	154,617	1,229	1,546
0,20	0,16	134,6706	134,1461	1,347	1,341
0,23	0,173	132,314	132,530	1,323	1,325

Tabulka 18: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,25$

α_1	α_2	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,25	0,15	140,648	115,365	1,406	1,154
0,25	0,20	126,395	140,725	1,264	1,407
0,25	0,18	132,638	130,283	1,326	1,303
0,25	0,183	131,750	131,818	1,318	1,318

Tabulka 19: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,30$

α_1	α_2	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,30	0,20	137,199	129,156	1,372	1,292
0,30	0,25	122,896	154,617	1,229	1,546
0,30	0,215	132,563	132,734	1,326	1,327
0,307	0,22	132,995	133,069	1,330	1,331

Hodnoty pro poměr $S/W=1$:

Tabulka 20: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,10$

α_1	α_2	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,10	0,55	209,419	173,444	2,094	1,734
0,10	0,60	172,633	212,157	1,726	2,122
0,107	0,58	190,118	189,416	1,901	1,894
0,106	0,58	189,893	190,171	1,899	1,902

Tabulka 21: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,15$

α_1	α_2	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,15	0,60	199,289	170,923	1,993	1,709
0,15	0,65	144,665	238,097	1,447	2,381
0,15	0,615	190,118	189,416	1,858	1,874
0,15	0,614	189,893	190,171	1,867	1,862

Tabulka 22: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,20$

α_1	α_2	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,20	0,65	220,050	178,629	2,200	1,786
0,20	0,70	114,073	326,483	1,141	3,265
0,203	0,665	204,283	206,435	2,043	2,064
0,215	0,676	215,779	214,230	2,158	2,142

Tabulka 23: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,25$

α_1	α_2	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,25	0,70	315,798	203,487	3,158	2,035
0,25	0,75	-195,591	914,640	-1,956	9,146
0,248	0,71	264,565	274,590	2,646	2,746
0,248	0,709	268,960	267,561	2,690	2,676

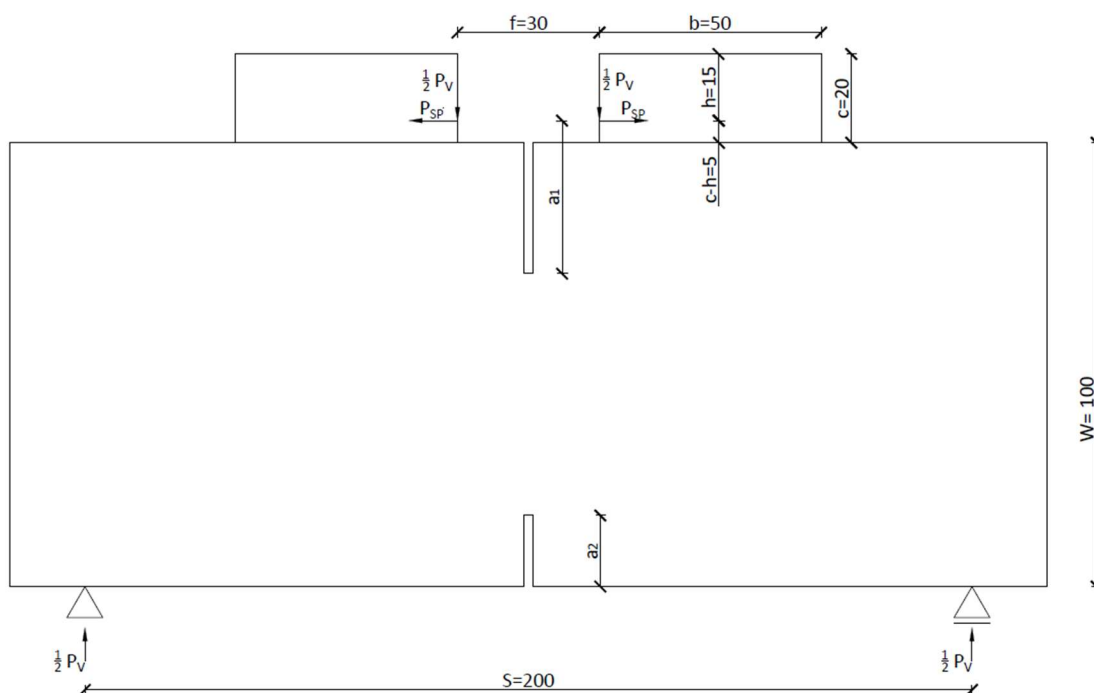
7. Doporučení pro experimentální provedení testu

Geometrie použitá pro parametrickou studii byla zjednodušeným modelem reálného tělesa. Pro testování bude nutno geometrii upravit tak, aby bylo mezi příložkami v horní části dostatek místa na vložení zatěžovacího aparátu. Pro volbu rozměrů tělesa byly použity výsledky modelování. Na základě vyhodnocení parametrů bude pro zkušební měření vybrán jeden model, jehož geometrie se patřičně upraví.

7.1. Zkušební těleso (Reálný model)

7.1.1. Geometrie a výpočet parametrů

Vzhledem na výsledky měření uvedené v předchozí kapitole práce bych pro experimentální měření doporučila těleso s následujícími rozměry. Vzhledem na tendenci podpory šíření obou trhlin a průběh T – *napětí*, které má hodnoty ukazující na dostatečnou směrovou stabilitu obou trhlin byl zvolen model odpovídající poměru rozpětí k výšce tělesa $S/W=2$. Při zachování výšky $W=100\text{ mm}$ bude rozteč kloubových podpěr 200 mm . Volné rozpětí mezi příložkami pro umístění klínu bude 30 mm , obdobně jako pro štípací test. Velikost příložek zůstane zachována.



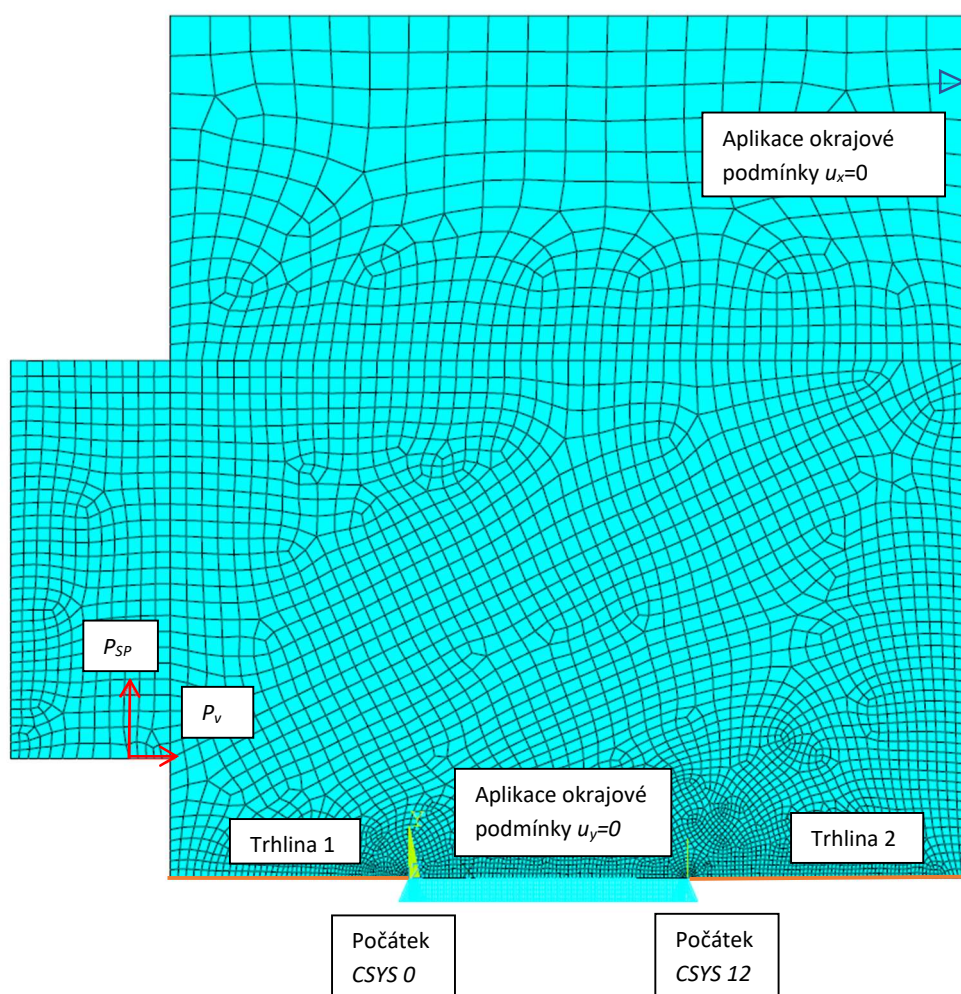
Obrázek 54: Geometrie zkušebního tělesa [10]

Působící zatížení tvořila dvojice sil stejné velikosti jako u modifikovaného štípacího testu. Opět budou sledovány koeficienty B_1 a B_2 při vzájemném růstu trhliny a následně růst zvláště vrchní a spodní při konstantní délce jedné z nich. Vztahy pro výpočet koeficientů B_1 a B_2 budou použity totožné jako pro výchozí štípací test. Výsledky budou porovnány se zjednodušenou výchozí geometrií.

7.1.2. Numerický model

Aby bylo přiblížení k analýze co největší, byly vstupní parametry pro výpočtové prostředí zachovány. Rovněž zůstaly nezměněny materiálové charakteristiky.

Geometrický model byl opět rozdělen v ose symetrie a nahrazení proběhlo formou okrajové podmínky v místě připojení k scházející části tělesa. Model byl orientován na výšku, tedy tak, aby osa x byla kladně orientována ve směru růstu. Vzhledem na přítomnost dvou trhlin bylo opět využito vytvoření druhého lokálního systému souřadnic v kořeni druhé trhliny s číslem 12.



Obrázek 55: Numerický model tělesa se zatížením

7.1.3. Výsledky a diskuze

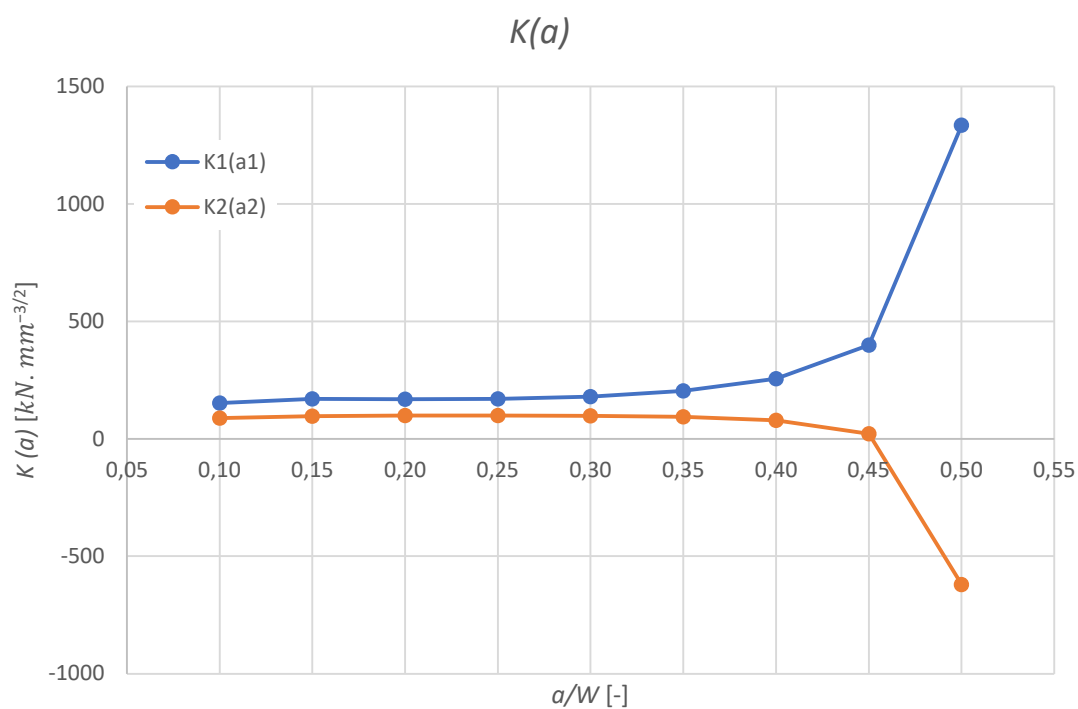
Současný růst délky trhlin

Tabulka 24: Výsledné hodnoty parametrů z numerického modelování

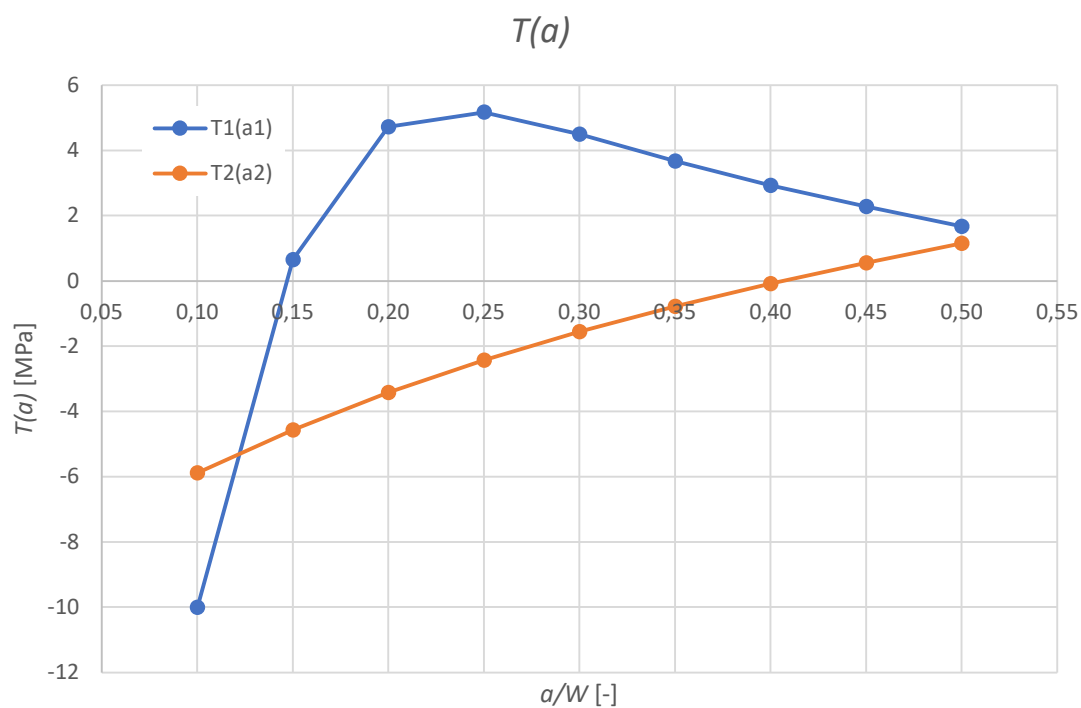
$\alpha_1=\alpha_2$	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$T_1(a_1)$	$T_2(a_2)$
0,10	152,639	88,013	-10,001	-5,885
0,15	169,318	96,334	0,646	-4,574
0,20	168,390	98,956	4,721	-3,424
0,25	169,643	99,064	5,171	-2,432
0,30	179,346	97,434	4,498	-1,562
0,35	203,165	92,850	3,668	-0,787
0,40	255,846	79,007	2,923	-0,089
0,45	398,058	21,210	2,278	0,547
0,50	1335,224	-620,219	1,673	1,152

Tabulka 25: Hodnoty parametrů B_1 a B_2 pro současný růst obou trhlin

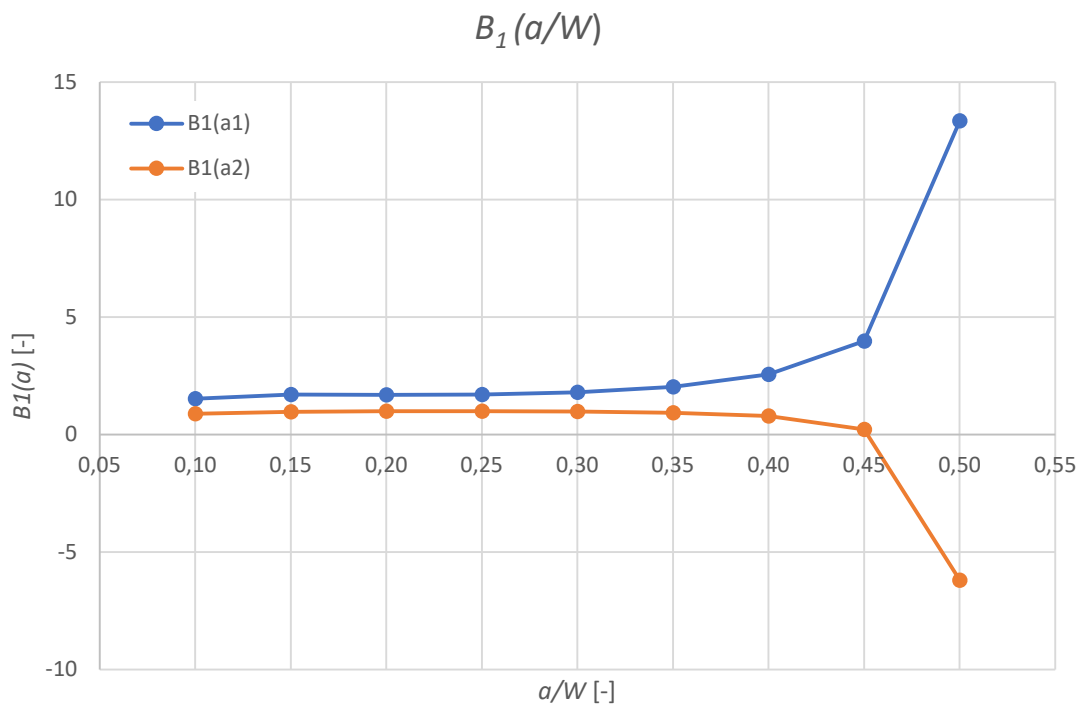
$\alpha_1=\alpha_2$	$K_1(a_1)$	$K_2(a_2)$	$T_1(a_1)$	$T_2(a_2)$
0,10	1,526	0,880	-1,029	-1,050
0,15	1,693	0,963	0,090	-1,119
0,20	1,684	0,990	0,881	-1,087
0,25	1,696	0,991	1,197	-0,964
0,30	1,793	0,974	1,182	-0,755
0,35	2,032	0,929	0,993	-0,466
0,40	2,558	0,790	0,718	-0,071
0,45	3,981	0,212	0,404	1,825
0,50	13,352	-6,202	0,098	-0,146



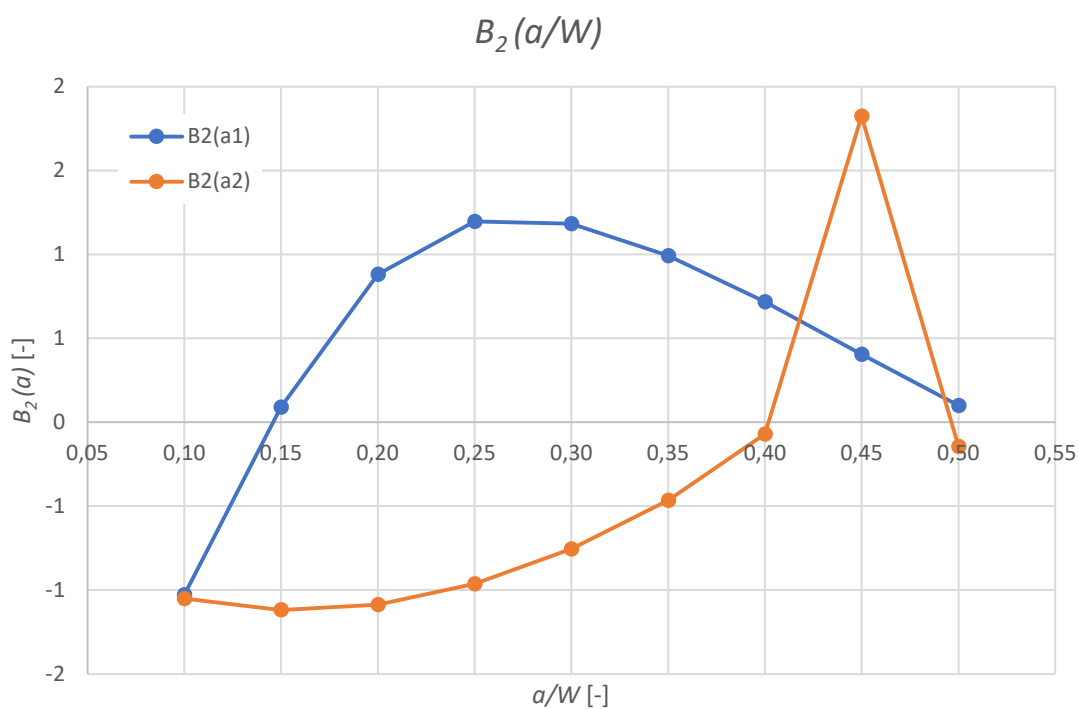
Obrázek 56: Grafické znázornění faktoru intenzity napětí pro současný růst trhlin



Obrázek 57: Grafické znázornění T -napětí pro současný růst trhlin



Obrázek 58: Grafické znázornění parametru $B_1(a)$ pro současný růst trhlin



Obrázek 59: Grafické znázornění parametru $B_2(a)$ pro současný růst trhlin

Z výsledků je zřejmé, že v téměř celém průběhu působí kolmo na směr trhlín tahové napětí, které podporuje růst obou trhlín. Změna nastává až při největších délkách, kdy napětí ve vrcholu spodní trhlíny přejde v tlak a trhlínu uzavírá. Větší koncentraci má napětí po celou dobu zatěžování v kořeni vrchní trhlíny. Negativem je, že tahle trhlína dosahuje také vyšších hodnot T – napětí co vyvoluje menší stabilitu ve směru růstu. Při poměru $\alpha = 0,25$ dosahuje T – napětí maxima a následně klesá směrem k tlakovým hodnotám. T – napětí ve vrcholu spodní trhlíny má stoupající průběh, avšak mírnějšího charakteru připomínající lineární závislost.

Parametr B_1 vykazuje tedy stejné tendence jako součinitel intenzity napětí v celém průběhu. Parametr B_2 , závislý na obou působících napětích, dosahuje rozdílného průběhu. U trhlíny horní, vzhledem na hodnotu faktoru intenzity napětí stoupající mírnou tendencí a následně dosahující maximální hodnot při minimálním směrovém napětím se průběh křivky přibližuje průběhu samotného T – napětí. U druhé trhlíny však hraje roli přechod do tlakové oblasti a dosažení minima hodnot v konečné fázi růstu trhlíny, což způsobuje neúměrně vysokou hodnotu parametru B_2 s dosažením maxima při $\alpha_2 = 0,45$.

Porovnáme-li výsledky se zjednodušeným modelem, nedochází zde při současném růstu trhlín v počátku k změně orientace větší intenzity z jedné trhlíny na druhou. Za zajímavé lze považovat, že změna působíště sil vyvolá větší intenzity na opačných trhlínách. Což se týče směrové stability, zatím co trhlína spodní si ji zachovává téměř totožnou, trhlína ve vrchní části působí ve výchozím modelu mnohonásobně směrově stabilněji, hodnotami pozitivně převyšující vrchní trhlínu.

Při porovnání s výchozími zkušebními konfiguracemi, má průběh napětí rovnoběžného a kolmého nejbližší pro horní trhlínu k původnímu štípacímu testu, zatím co pro dolní trhlínu k tříbodovému ohybu. Geometrii tak můžeme považovat za vhodnou kombinaci obou testů.

Vyjádříme-li závislosti parametrů na poměru α vzniknou polynomičké rovnice:

$$B_1(\alpha_1) = 143712\alpha^6 - 229290\alpha^5 + 146318\alpha^4 - 47426\alpha^3 + 8174,6\alpha^2 - 704,77\alpha + 25,207;$$

$$R^2 = 0,9997$$

$$B_1(\alpha_1) = -116660\alpha^6 + 188016\alpha^5 - 121421\alpha^4 + 40005\alpha^3 - 7056,8\alpha^2 + 629,13\alpha - 21,097;$$

$$R^2 = 0,9994$$

$$B_1(\alpha_1) = -0,7745\alpha^4 + 119,05\alpha^3 - 148,37\alpha^2 + 55,115\alpha - 5,1918;$$

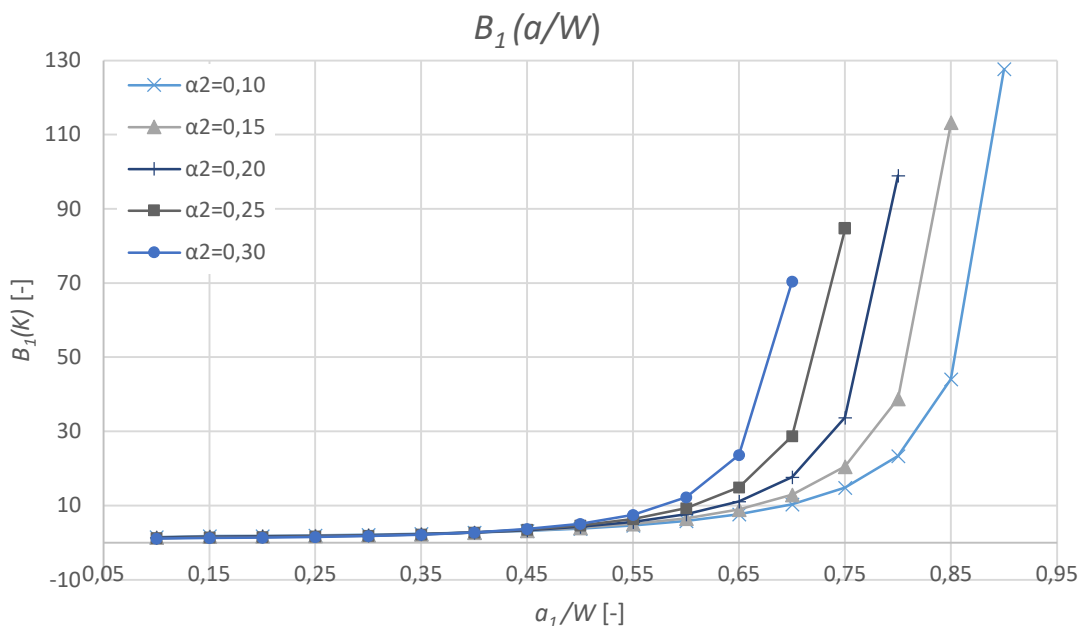
$$R^2 = 0,9986$$

$$B_1(\alpha_1) = 62,547\alpha^4 - 63,702\alpha^3 + 40,809\alpha^2 - 9,0815\alpha - 0,4925;$$

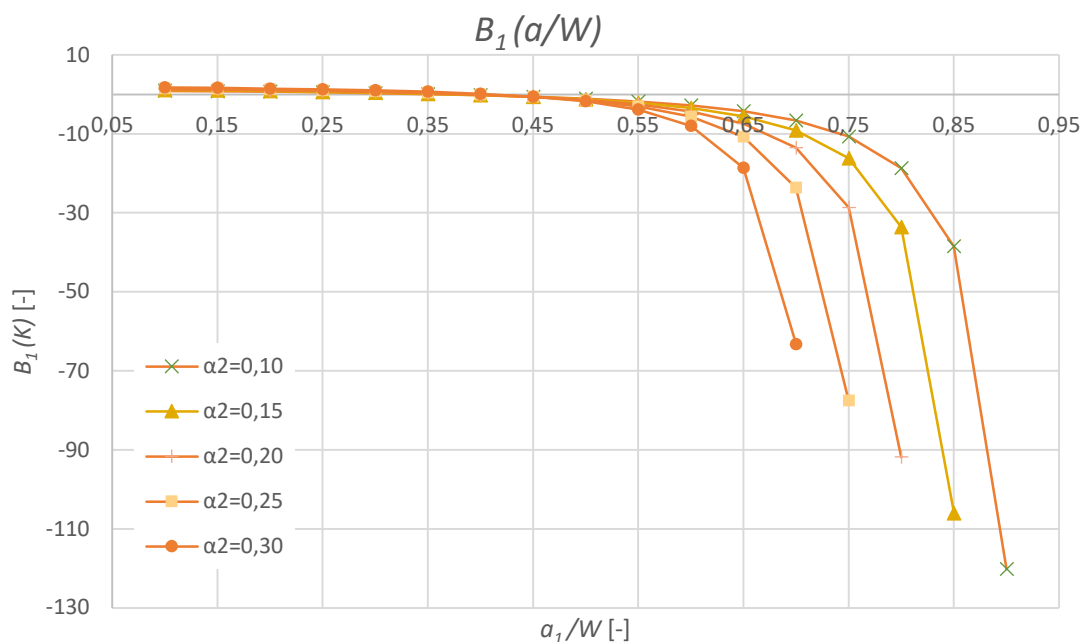
$$R^2 = 1.$$

Růst trhliny 1 za konstantní délky trhliny 2

V další části budou simulace provedeny za předchozích vzorů. Výsledky budou znázorněny pouze graficky a numerické výsledky budou k nalezení v příloze. Porovnávány budou pouze jednotlivé parametry B_1 a B_2 .



Obrázek 60: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha_1)$ pro trhlínu 1 při růstu trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2



Obrázek 61: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha_1)$ pro trhlínu 2 při růstu trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2

Vzhledem na nejlepší možnost porovnání bylo grafické znázornění provedeno zvlášť pro jednotlivé trhliny. Z porovnání je zřetelné, že rostoucí délkou konstantní trhliny dosahuje intenzita napětí u rostoucí trhliny prudšího růstu na kratším intervalu. U trhlín, které mohou dosahovat větší délku napětí narůstá klidněji, avšak dosahuje vyšších hodnot. Vysvětluje to přímá úměra mezi délkou trhliny a působícím napětím. V grafu je viditelná úměra mezi jednotlivými případy pro hodnoty, u kterých součet délek trhlín zůstává stejný, je však rozdělen vzhledem k poměru konstantní délky trhliny 1. Tyto hodnoty lze spojit přímkou konstantního sklonu, který stoupá s délkou. Rozdíl je nejlépe pozorovat u poměrů ve vrchní polovině rozmezí.

Podle předpokladů nastává přibližně stejnoměrná tendence působení napětí negativně na růst trhliny 2. Rozdíl v hodnotách tlakových a tahových zapříčiňuje působení v počátku, kdy působí tah pozitivně k růstu obou trhlín, dosahující dokonce u $\alpha_2=0,25$ a $0,30$ v počátečních stádiích větší hodnoty tahového napětí u nerostoucí trhliny. Při délkách trhliny 1 přibližujícím se k délkám trhliny konstantní však dosáhne napětí větších intenzit. Při porovnání s výchozím zjednodušeným modelem je průběh porovnatelný i výsledky v řádech totožné, maximální hodnoty však výchozí převyšují. Změna v geometrii má za následek taky eliminaci výměny koncentrací napětí pro $\alpha_2=0,2$. Závislost parametrů byla tentokrát vyčíslena pro rostoucí trhlínu pro všechny celý interval:

$$B_1(\alpha_1)_{\alpha_2=0,10} = 8266,8\alpha^6 - 20394\alpha^5 + 19816\alpha^4 - 9527\alpha^3 + 2358,6\alpha^2 - 277,78\alpha + 13,594;$$

$$R^2 = 0,9992$$

$$B_1(\alpha_1)_{\alpha_2=0,15} = 9996,2\alpha^6 - 23291\alpha^5 + 21427\alpha^4 - 9779,6\alpha^3 + 2307,3\alpha^2 - 260,25\alpha + 12,37;$$

$$R^2 = 0,9995$$

$$B_1(\alpha_1)_{\alpha_2=0,20} = 12078\alpha^6 - 26487\alpha^5 + 22998\alpha^4 - 9935,5\alpha^3 + 2228,1\alpha^2 - 240,13\alpha + 11,062;$$

$$R^2 = 0,9996$$

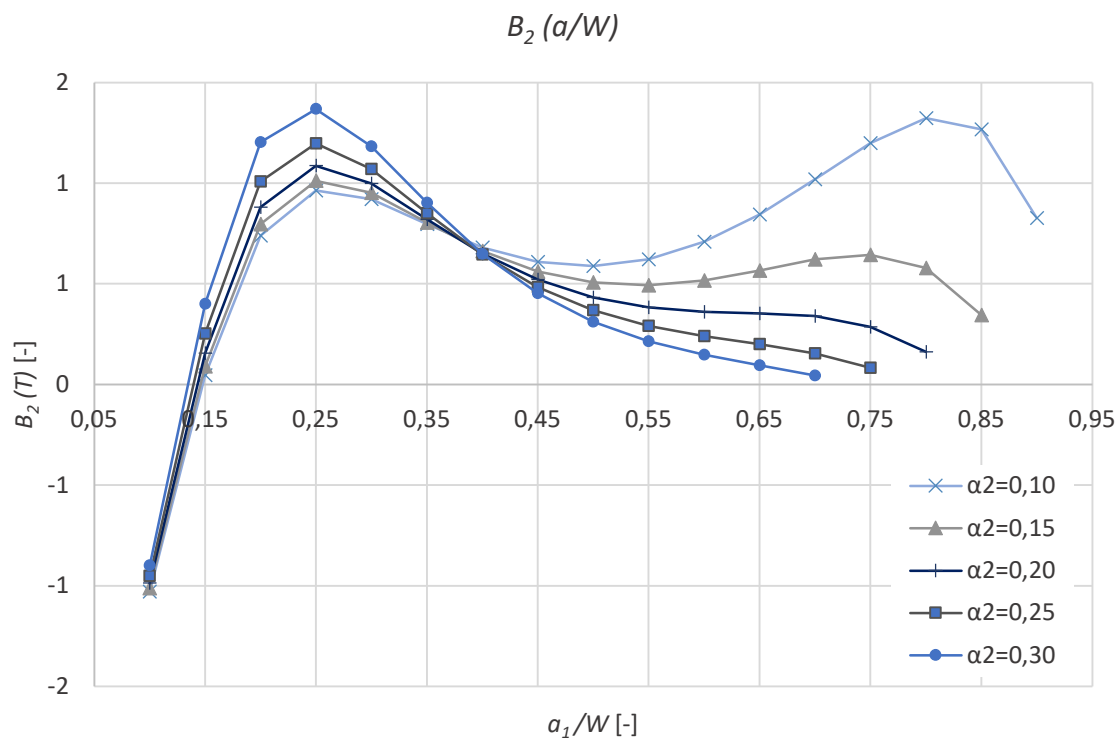
$$B_1(\alpha_1)_{\alpha_2=0,25} = 14548\alpha^6 - 29911\alpha^5 + 24424\alpha^4 - 9954,2\alpha^3 + 2115,5\alpha^2 - 217,27\alpha + 9,6789;$$

$$R^2 = 0,9998$$

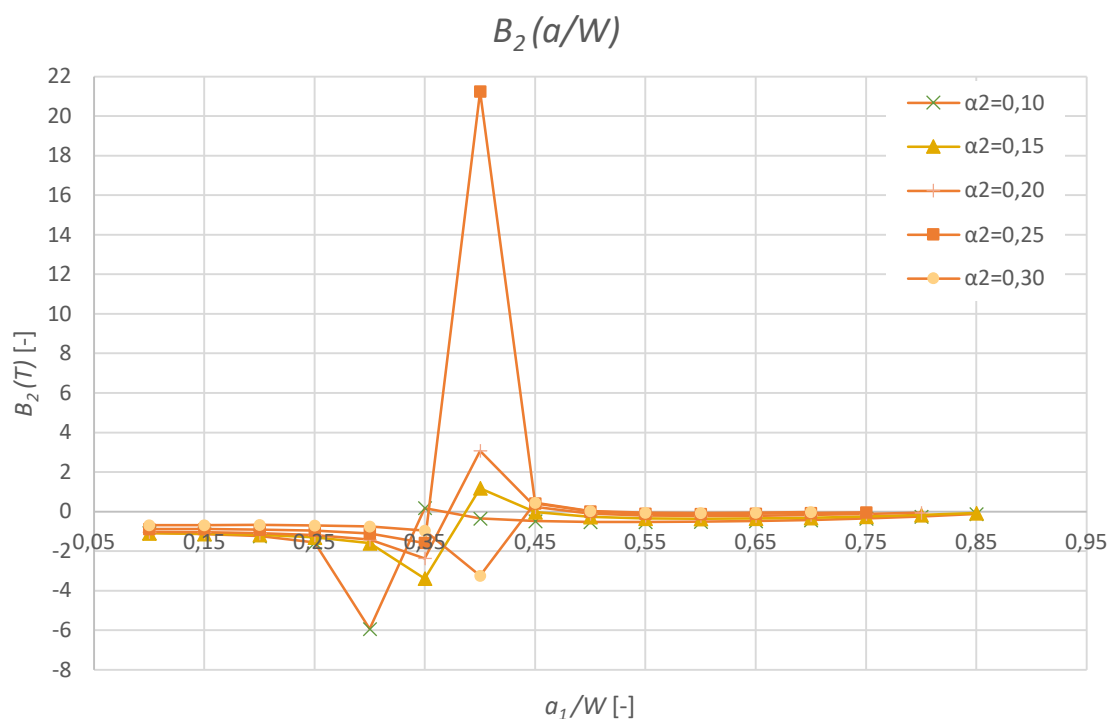
$$B_1(\alpha_1)_{\alpha_2=0,30} = 17389\alpha^6 - 33368\alpha^5 + 25520\alpha^4 - 9774,8\alpha^3 + 1961,9\alpha^2 - 191,49\alpha + 8,2243;$$

$$R^2 = 0,9999.$$

Z hodnot koeficientů je zřetelná přibližně stejnoměrná změna v závislosti na konstantní délce vysvětlující klesající tendenci dosažených hodnot.



Obrázek 62: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha_1)$ pro trhlinu 1 při růstu trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2



Obrázek 63: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha_1)$ pro trhlinu 2 při růstu trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2

Funkce parametru B_2 , závislá na poměru parametrů K a T – *napětí* má pro trhlinu rostoucí porovnatelný průběh. V počátku růstu, kdy je intenzita kolmého napětí v minimu, dosahuje T -*napětí* tlakových hodnot a trhlinu ztrácí počáteční stabilitu. Následně se poměr dostává do nižších hodnot, tedy nastává výraznější růst kolmého napětí za zvyšující se stability růstu trhliny. U nejmenších hodnot α_2 však opět nastává tendence zvyšujících se hodnot tahového nestabilního rovnoběžného napětí, které dosahuje u nejmenších poměrů α_2 maxima ke konci růstu trhliny.

Průběh funkce parametru B_2 ukazuje přibližně stejnoměrný lineární průběh. Výjimkou je rozkmit na intervalu $\alpha_1 \in <0,25;0,40>$ pro $\alpha_2=0,10$, $\alpha_1 \in <0,30;0,45>$ u $\alpha_2=0,15$, $0,20$ a $0,25$ a $\alpha_1 \in <0,35;0,50>$ pro $\alpha_2=0,30$. Na zmíněných intervalech dosahuje funkce výrazného minima a následně maxima hodnot. Důvodem je přechod hodnot působícího nejprve na růst trhliny kladně do záporných mezí, při kterých dosahuje minima intenzit. T -*napětí* však vykazuje poměrně vysokých záporných hodnot, což způsobuje nepoměr a výkyvy v průběhu.

Závislost parametrů byla opět vyčíslena pro rostoucí trhlinu pro všechny případy:

$$B_2(\alpha_1)_{\alpha_2=0,10} = -206,38\alpha^6 + 654,91\alpha^5 - 942,02\alpha^4 + 772,87\alpha^3 - 357,81\alpha^2 + 83,032\alpha - 6,4641;$$

$$R^2 = 0,9971$$

$$B_2(\alpha_1)_{\alpha_2=0,15} = 13,583\alpha^6 + 71,134\alpha^5 - 348,97\alpha^4 + 481,28\alpha^3 - 287,48\alpha^2 + 75,435\alpha - 6,1472;$$

$$R^2 = 0,9967$$

$$B_2(\alpha_1)_{\alpha_2=0,20} = 279,72\alpha^6 - 596,91\alpha^5 + 293,6\alpha^4 + 185,74\alpha^3 - 222,83\alpha^2 + 69,544\alpha - 5,939;$$

$$R^2 = 0,9971$$

$$B_2(\alpha_1)_{\alpha_2=0,25} = 749,76\alpha^6 - 1728,3\alpha^5 + 1340,2\alpha^4 - 276,26\alpha^3 - 126,17\alpha^2 + 61,258\alpha - 5,6709;$$

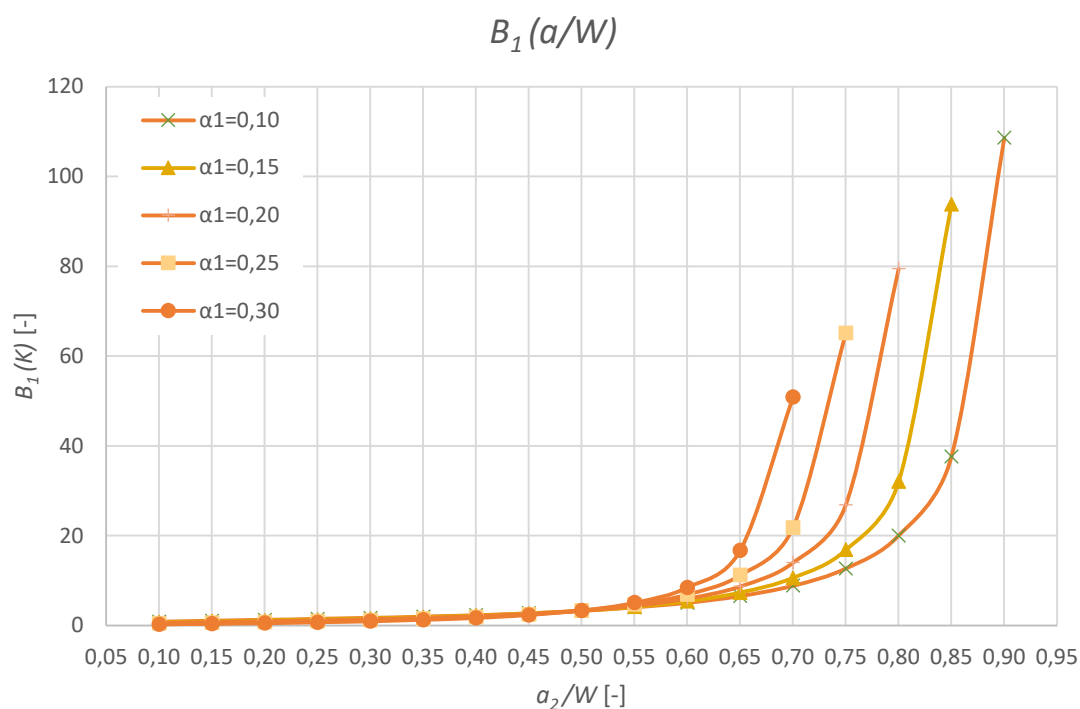
$$R^2 = 0,9976$$

$$B_2(\alpha_1)_{\alpha_2=0,30} = 1744,6\alpha^6 - 4021,7\alpha^5 + 3380,7\alpha^4 - 1147,4\alpha^3 + 52,13\alpha^2 + 46,004\alpha - 5,1833;$$

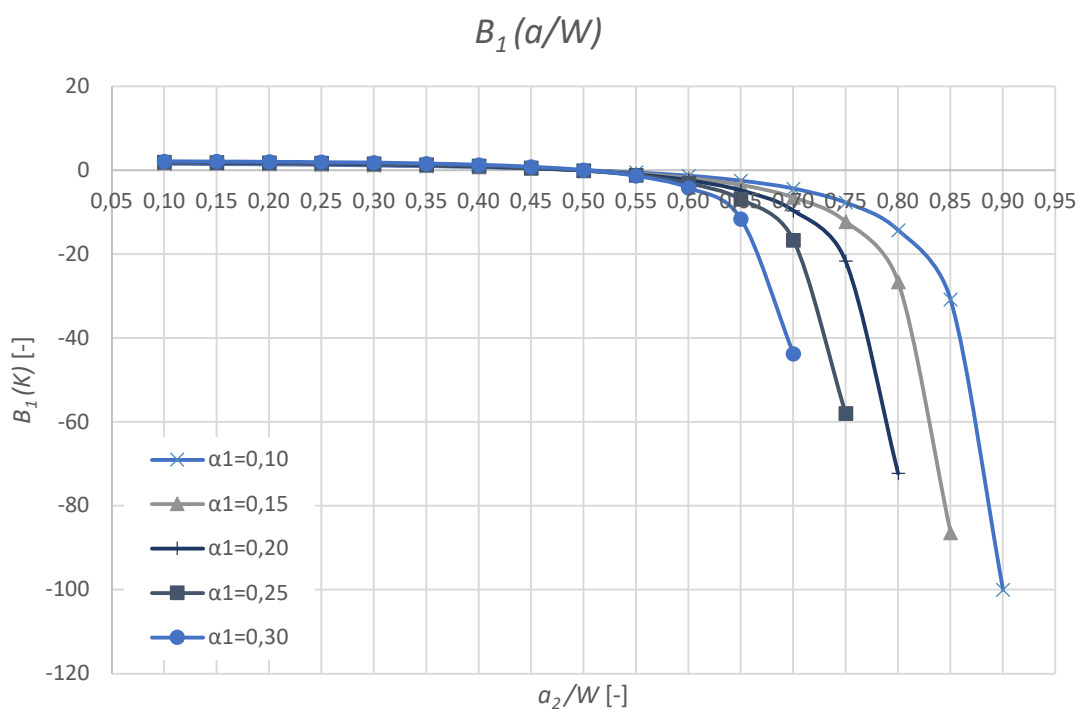
$$R^2 = 0,9982.$$

Vzhledem na zachování přibližně stejných přesností jako u předchozích případů byly zvoleny polynomy 6tého stupně.

Růst trhliny 2 za konstantní délky trhliny 1



Obrázek 64: Grafické znázornění parametru $B_1(a_2)$ pro trhlínu 1 při růstu trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1



Obrázek 65: Grafické znázornění parametru $B_1(a_2)$ pro trhlínu 2 při růstu trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1

Průběh napětí pro jednotlivé trhliny má opět tendenci zvětšovat se v kořeni trhliny rostoucí a klesat v trhlíně konstantní. Počáteční hodnoty však ukazují působení většího tahového napětí u trhliny vrchní. K výměně intenzit napětí dojde u všech trhlín, zpravidla při převýšení poměru délky rostoucí trhliny konstantní poměr o přibližně $\alpha=0,10$. Zatím co v celém průběhu růstu působí na spodní trhlínu napětí tahové, po dosažení poloviny konečné délky začíná napětí v horní části způsobovat tlak zabraňující tendenci růstu trhliny. Dosažené hodnoty dosahují velikosti přibližující se k hodnotám při růstu trhliny 1.

V porovnání s výchozím modelem nenastávají výrazné rozdíly hodnot nebo průběhů, avšak k výměně intenzit napětí při zjednodušení dochází už při délkách trhliny rostoucí nižších jako konstantní.

Což se týče přechodu hodnot napětí u konstantní trhliny, přechází z tahových do tlakových později, tedy až po dosažení délky rostoucí trhliny hodnot α vyšších jako u předchozího případu o přibližně $0,10$. Napětí tak kladné, jako záporné závisí opět na délce trhliny a má tendenci růstu prudšího při kratších výchozích délkách neporušené části tělesa mezi trhlínami.

Polynomická závislost mezi parametry B_1 a délkou rostoucí trhliny:

$$B_1(\alpha_2)_{\alpha_2=0,10} = 17389\alpha^6 - 33368\alpha^5 + 25520\alpha^4 - 9774,8\alpha^3 + 1961,9\alpha^2 - 191,49\alpha + 8,2243;$$

$$R^2 = 0,9999$$

$$B_1(\alpha_2)_{\alpha_2=0,15} = 8520\alpha^6 - 19994\alpha^5 + 18567\alpha^4 - 8580,8\alpha^3 + 2054,8\alpha^2 - 234,05\alpha + 10,616;$$

$$R^2 = 0,9995$$

$$B_1(\alpha_2)_{\alpha_2=0,20} = 10044\alpha^6 - 22215\alpha^5 + 19505\alpha^4 - 8554,1\alpha^3 + 1953,9\alpha^2 - 213,66\alpha + 9,3189;$$

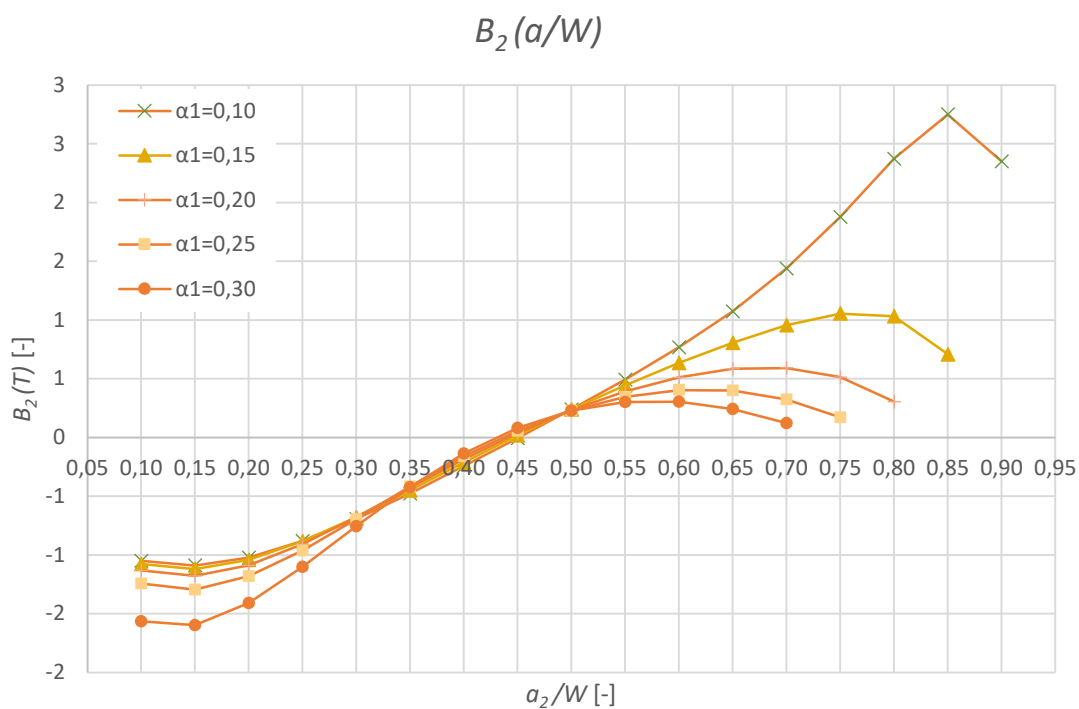
$$R^2 = 0,9996$$

$$B_1(\alpha_2)_{\alpha_2=0,25} = 11674\alpha^6 - 24245\alpha^5 + 20063\alpha^4 - 8326,4\alpha^3 + 1810,1\alpha^2 - 189,72\alpha + 7,9162;$$

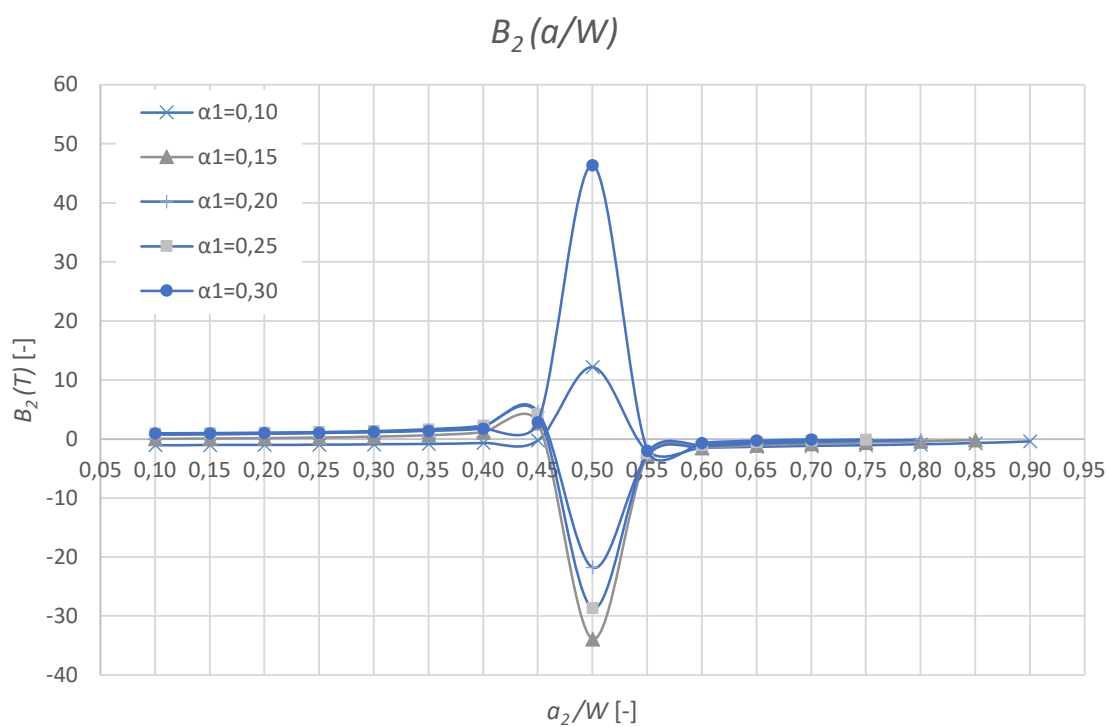
$$R^2 = 0,9998$$

$$B_1(\alpha_2)_{\alpha_2=0,30} = 13223\alpha^6 - 25683\alpha^5 + 19959\alpha^4 - 7815,1\alpha^3 + 1613,3\alpha^2 - 161,87\alpha + 6,4062;$$

$$R^2 = 0,9999.$$



Obrázek 66: Grafické znázornění parametru $B_2(a_2)$ pro trhlinu 1 při růstu trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1



Obrázek 67: Grafické znázornění parametru $B_2(a_2)$ pro trhlinu 2 při růstu trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1

Funkce parametru B_2 pro rostoucí trhlinu má na většinové části definičního oboru rostoucí průběh připomínající lineární závislost. Poněvadž si napětí kolmé na směr růstu trhliny udržuje kladní hodnoty, záleží výsledné znaménko funkce pouze na působícím T-napětí. Je tedy zřejmé, že až do intervalu $\alpha_2 \in <0,25;0,40>$ se drží v tlakových hodnotách. Maximum tady dosahuje v úplném počátku, tedy na intervalu $\alpha_2 \in <0,10;0,15>$, kde vykazuje klesající tendenci. Následuje růst a opětovně klesá až v konečných mezích. Maxima záporných hodnot vycházejících z maximální stability směrového rozvoje dosahuje při $\alpha_1=0,3$. I v průběhu růstu má funkce tendenci udržovat si minimální hodnoty. Opakem je funkce při $\alpha_2=0,1$, která dosahuje maxima kladných hodnot. Příčinou prudšího růstu hodnot je taky mírnější průběh růstu napětí kolmého.

Funkce T – napětí konstantní trhliny má rovněž stoupající charakter, avšak jeho charakter je ve všech případech tahový. Rozkmit poměrů nastává opět ze už zmíněného důvodu, tedy přechodu napětí v kořeni z tahové do tlakové orientace při dosažení jeho minima. Pro α_1 v krajních hodnotách, tedy 0,1 a 0,3 nastává dosažení maximálních kladných a následně záporných hodnot na intervalu $\alpha_2 \in <0,45;0,60>$ s výraznějším maximem, zatím co u hodnot mezilehlých u $\alpha_2 \in <0,40;0,55>$ s výraznějším minimem.

Polynomičká závislost mezi parametry B_1 a délkou rostoucí trhliny:

$$B_2(\alpha_2)_{\alpha_2=0,10} = -622,64\alpha^6 + 1654,5\alpha^5 - 1679,4\alpha^4 + 812,48\alpha^3 - 185,13\alpha^2 + 19,597\alpha - 1,8358;$$

$$R^2 = 0,9993$$

$$B_2(\alpha_2)_{\alpha_2=0,15} = -224,29\alpha^6 + 526,12\alpha^5 - 451,69\alpha^4 + 154,28\alpha^3 - 4,2338\alpha^2 - 3,8537\alpha - 0,7678;$$

$$R^2 = 0,9999$$

$$B_2(\alpha_2)_{\alpha_2=0,20} = -224,29\alpha^6 + 526,12\alpha^5 - 451,69\alpha^4 + 154,28\alpha^3 - 4,2338\alpha^2 - 3,8537\alpha - 0,7678;$$

$$R^2 = 0,9999$$

$$B_2(\alpha_2)_{\alpha_2=0,25} = -66,155\alpha^6 + 112,69\alpha^5 - 25,893\alpha^4 - 70,641\alpha^3 + 58,845\alpha^2 - 12,171\alpha - 0,4319;$$

$$R^2 = 1$$

$$B_2(\alpha_2)_{\alpha_2=0,30} = -25,225\alpha^6 + 4,1304\alpha^5 + 102,72\alpha^4 - 158,16\alpha^3 + 90,598\alpha^2 - 17,006\alpha - 0,3018;$$

$$R^2 = 1.$$

Rovnající se hodnoty parametrů

Při již zmíněných poměrech dojde k výměně strany větší intenzity působícího napětí. Musí tedy dojít taky k případu, kdy nastává jejich rovnost.

Tabulka 26: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,25$

α_1	α_2	K_1	K_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,10	0,25	127,393	149,457	1,274	1,495
0,15	0,25	147,390	136,277	1,474	1,363
0,12	0,25	138,883	144,794	1,389	1,448
0,13	0,25	142,439	142,114	1,424	1,421

Tabulka 27: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,30$

α_1	α_2	K_1	K_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,20	0,30	139,766	143,493	1,398	1,435
0,21	0,30	141,972	139,761	1,420	1,398
0,205	0,30	140,832	141,644	1,408	1,416
0,206	0,30	141,053	141,271	1,411	1,413

Tabulka 28: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,10$

α_1	α_2	K_1	K_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,10	0,20	138,211	128,453	1,382	1,285
0,10	0,22	134,210	136,632	1,342	1,366
0,10	0,21	136,263	132,514	1,363	1,325
0,11	0,23	138,853	138,608	1,389	1,386

Tabulka 29: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,15$

α_1	α_2	K_1	K_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,15	0,25	147,390	136,277	1,577	-3,070
0,15	0,27	141,412	145,369	1,414	1,414
0,15	0,26	144,476	140,754	1,445	1,445
0,16	0,27	143,199	142,243	1,432	1,422
0,15	0,265	142,965	143,043	1,430	1,430

Tabulka 30: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,20$

α_1	α_2	K_1	K_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,20	0,30	139,766	143,493	5,351	-2,066
0,20	0,29	143,417	138,280	1,434	1,383
0,21	0,29	145,610	134,528	1,456	1,345
0,19	0,29	141,482	141,892	1,415	1,419

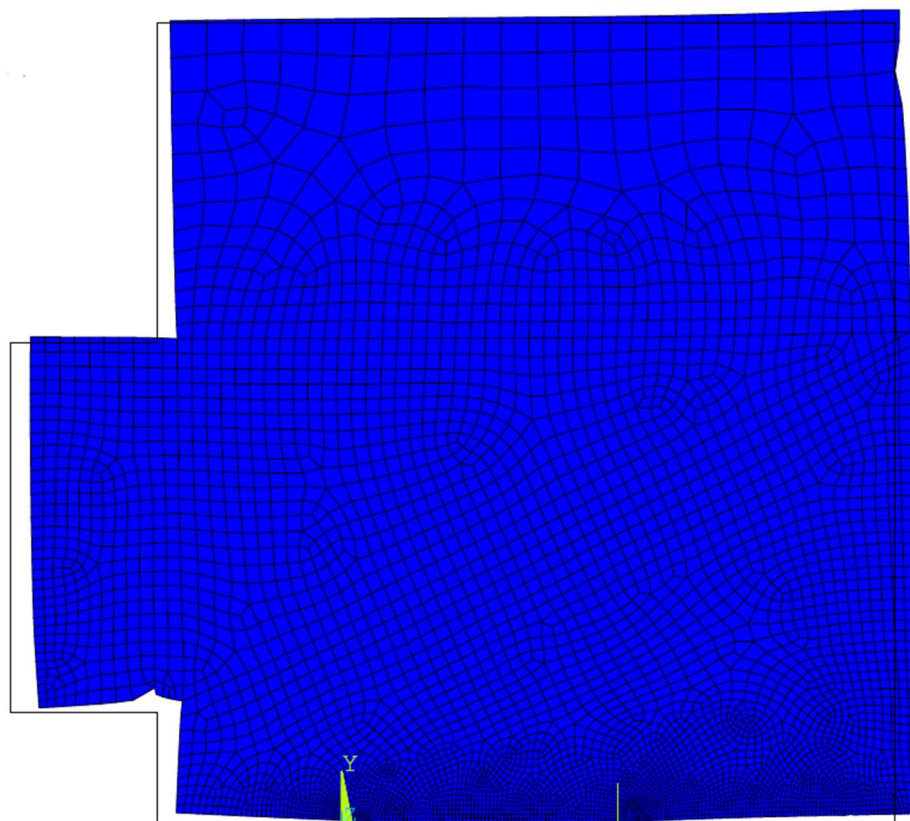
Tabulka 31: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,25$

α_1	α_2	K_1	K_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,25	0,30	154,235	123,192	1,542	1,232
0,25	0,35	132,802	154,090	1,328	1,541
0,25	0,32	146,514	134,575	1,465	1,346
0,24	0,32	142,803	138,960	1,428	1,390
0,24	0,325	140,689	141,979	1,407	1,420
0,24	0,326	141,117	141,369	1,411	1,414

Tabulka 32: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,30$

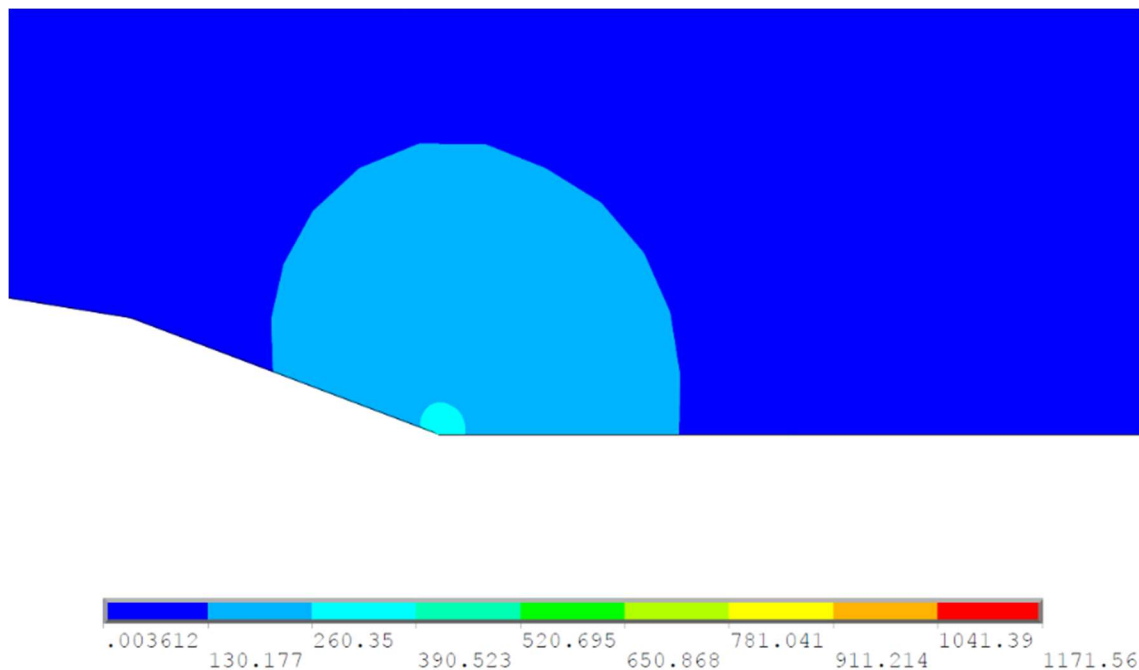
α_1	α_2	K_1	K_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$
0,30	0,35	159,685	128,713	4,646	-0,988
0,30	0,40	129,894	172,448	4,825	-0,378
0,30	0,37	149,271	144,362	1,493	1,444
0,30	0,375	146,382	148,627	1,464	1,486
0,30	0,373	147,553	146,904	1,476	1,469

Deformace tělesa

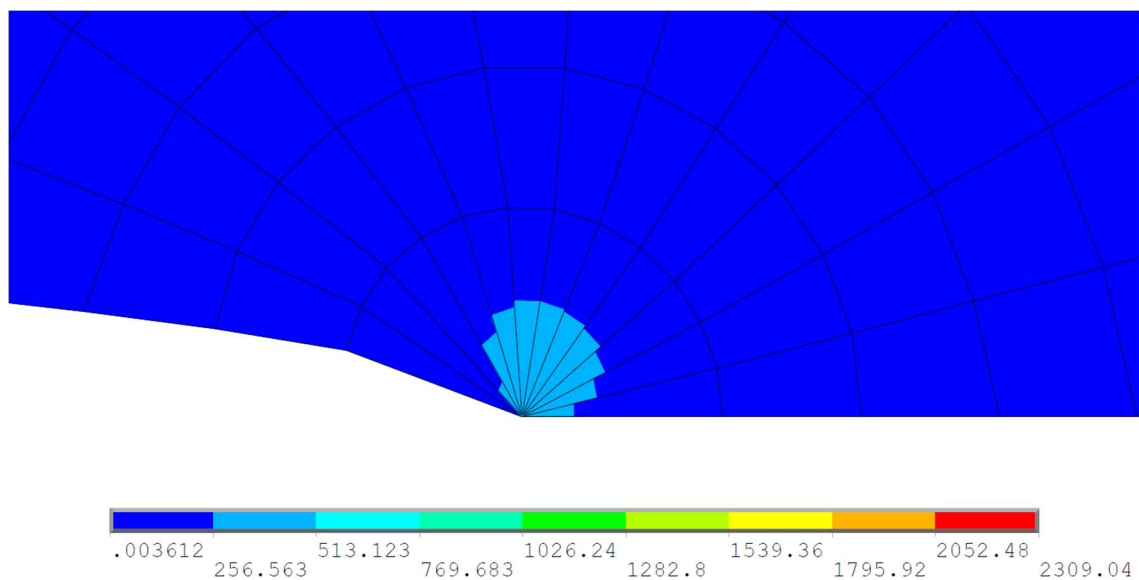
**Obrázek 68:** Demonstrace deformace tělesa při rovnajících se hodnotách parametrů

Pole napětí

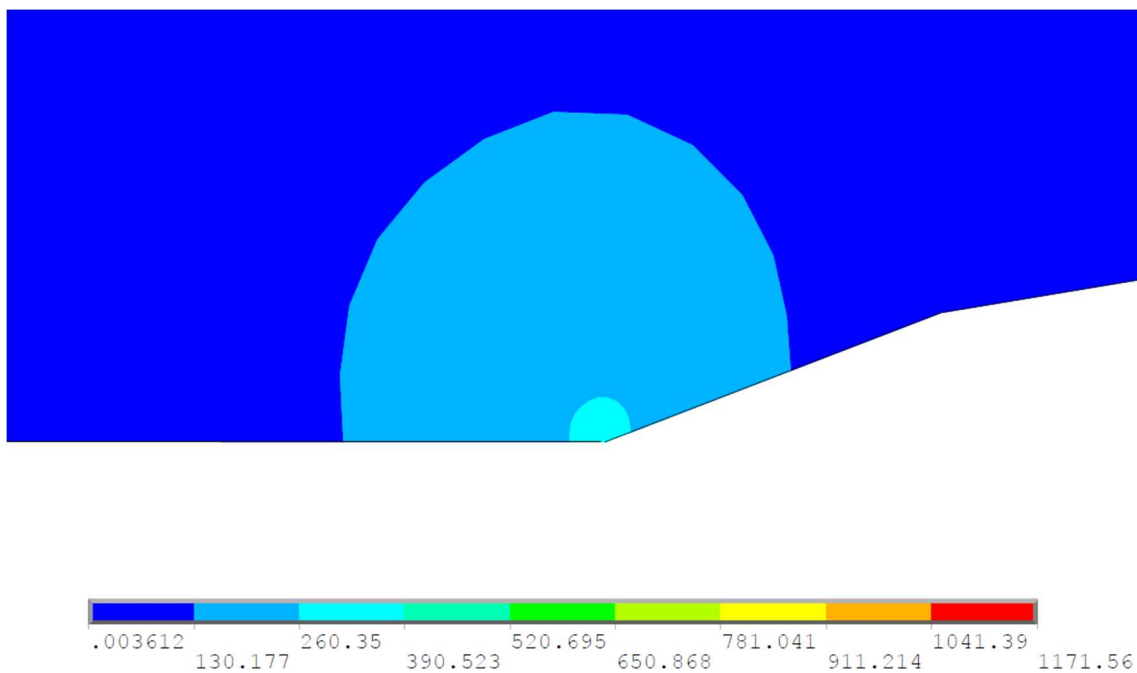
Grafické zobrazení pole vystihuje napětí působící v kořenech pro rovnající se hodnoty parametrů obou trhlin na úrovni uzlů i elementů sítě konečných prvků.



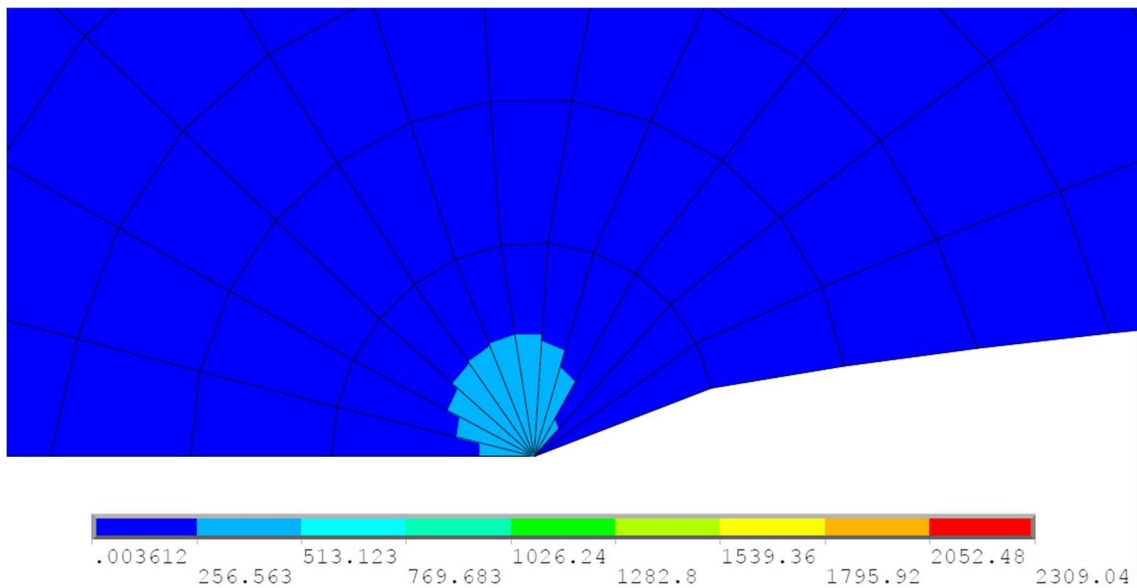
Obrázek 69: Výsledné napětí v trhlině 1 na úrovni uzlů



Obrázek 70: Výsledné napětí v trhlině 1 na úrovni prvků sítě



Obrazek 71: Výsledné napětí v trhlině 2 na úrovni uzlů



Obrazek 72: Výsledné napětí v trhlině 2 na úrovni prvků sítě

8. Závěr

V první části práce byly sestaveny výchozí modely pro lomové zkoušky tříbodovým ohybem, tahovou zkouškou a štípacím testem. Sloužily jako výchozí geometrie a pro určení správnosti modelování. Následně byl sestaven model tělesa při štípací zkoušce s netradiční geometrií.

Modifikace štípacího testu byla založena na přítomnosti dvou trhlin. Hlavním předmětem studie byla analýza lomově-mechanických parametrů B_1 (souvisejícím s *faktorem intenzity napětí*) a B_2 (souvisejícím s *T-napětím*) a jejich závislostí na změně geometrických vlastností modelu. Variace geometrie proběhla změnou poměru rozpětí kloubových podpor k výšce tělesa a to $S/W=1,2,3$ a 4. Zkoumané tedy bylo tedy chování napětí v kořenech obou trhlin a vzájemný vztah napětí a změny délky trhliny. Ta byla opět vyjádřena poměrově k výšce tělesa. Vyhodnocení proběhlo na základě tří situací. V první rostly obě trhliny současně, následně rostla jedna za konstantní délky druhé a nakonec se jejich pořadí vyměnilo.

Výsledky modelování možno shrnout v poznatek, že pokud se bude podélný rozměr tělesa zvětšovat, znamená to, že namáhání v průběhu zkoušky má tendenci se blížit se spíše k tříbodovému ohybu. Tah vyvozený podporovými reakcemi v spodních vláknech má tendenci podpořit v růstu právě spodní trhlínu. Naopak, při rozpětí nejmenším vyvozuje největší vliv síla vodorovná a můžeme test přirovnat k výchozímu štípacímu testu, při kterém klín způsobuje růst horní trhliny. Na mezi rozhraní stojí poměr $S/W=2$, u kterého se prokázala největší pravděpodobnost působení napětí pro šíření obou trhlin. V závěre práce byl právě tento případ stanoven jako doporučení pro experimentální provedení.

Seznam zdrojů a použité literatury

- [1] POOK, L. P. Linear Elastic Fracture Mechanics for Engineers: Theory and Applications. 1. London: WIT Press, 2000. ISBN 978-1853127038.
- [2] NALLATHAMBI, P. a B. L. KARIHALOO. Determination of specimen-size independent fracture toughness of plain concrete. Magazine of Concrete Research. 1986, 38(135), 67-76. DOI: 10.1680/mac.1986.38.135.67.
- [3] JAIME, P., BAŽANT, Z. P., ed. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials: Structural Application and Numerical Calculation. 1. Boca Raton: CRC Press, 1992. ISBN 978-0849382840.
- [4] ZHU, Zhe-Ming. A new method for measurement of fracture toughness KIC by three point bend specimen. Engineering Fracture Mechanics. 1993, 45(2), 141-147. DOI: 10.1016/0013-7944(93)90183-S. ISSN 00137944. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/001379449390183S>
- [5] SEITL, S. , MIARKA, P. a KALA, Z.. Geometry Functions for Edge Cracks in Steel Bridge under Three- and Four- Point Bending with Various Span. Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series. 2019, 18(2). DOI: 10.31490/tces-2018-0015. ISSN 12131962. Dostupné také z: <http://tces.vsb.cz/Home/ArticleDetail/461>
- [6] KNÉSL, Z., BEDNÁŘ, K. Dvoupárametrová lomová mechanika: výpočet párametrů a jejich hodnoty. Brno: ÚFM AVČR, 1998.
- [7] Z. KNÉSL, K. BEDNÁŘ, J.C. RADON. Influence of T-stress on the rate of propagation of fatigue crack. Physical Mesomechanics, 2000, 3, 5–9.
- [8] BRÜHWILER, E. A F.H. WITTMANN. The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests. *Engineering Fracture Mechanics*. 1990, 35(1-3), 117-125. DOI: 10.1016/0013-7944(90)90189-N. ISSN 00137944. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/001379449090189N>
- [9] S. SEITL, V. VESELÝ, L. ŘOUTIL. Two-parameter fracture mechanical analysis of a near-crack-tip stress field in wedge splitting test specimens, Computers & Structures, 89 (21–22) (2011) 1852-1858
- [10] Autodesk®, AutoCAD Student, Release 2020, Autodesk, Inc..
- [11] S. SEITL, P. MIARKA, I. MERTA, Z. KERŠNER. Numerical Stress Analysis of the Biaxial Tension-Compression Wedge-Splitting Test in Vicinity of the Crack Tip. In Local Mechanical Properties XIII. Key Engineering Materials (web). Trans Tech Publications, Switzerland, 784 (2018) 85-90
- [12] ISMAIL, A. E. , JAMIAN, S., KAMARUDIN, K., MOHD NOR, M., IBRAHIM, M.N. a CHOIRON. An Overview of Fracture Mechanics with ANSYS. International Journal of

Integrated Engineering [online]. 2018, 10(5). DOI: 10.30880/ijie.2018.10.05.010. ISSN 2229838X. Dostupné z:

<http://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/2938/1697>

[13] COURTIN, S., GARDIN, C., BÉZINE, G. a BEN HADJ HAMOUDA, H.. Advantages of the J-integral approach for calculating stress intensity factors when using the commercial finite element software ABAQUS. *Engineering Fracture Mechanics*. 2005, 72(14), 2174-2185. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2005.02.003. ISSN 00137944. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013794405000767>

[14] SONG, S.H. a H. PAULINO, G.. Dynamic stress intensity factors for homogeneous and smoothly heterogeneous materials using the interaction integral method. *International Journal of Solids and Structures*. 2006, 43(16), 4830-4866. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2005.06.102. ISSN 00207683. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020768305004816>

[15] SEITL, S., B. NIETO GARCÍA a I. MERTA. Wedge splitting test method: quantification of influence of glued marble plates by two-parameter fracture mechanics. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2014, 8(30), 174-181. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.30.23. ISSN 19718993. Dostupné také z: <https://www.fracturae.com/index.php/fis/article/view/IGF-ESIS.30.23>

[16] Ansys® Academic Mechanical APDL, Release 19.2, ANSYS, Inc

[17] Ansys® Academic Mechanical APDL, Release 19.2, Help system, Element Reference, Element Library, ANSYS, Inc

[18] Microsoft Office, Microsoft Excel, Release 2019, Microsoft Corporation.

[19] TADA, H., Paul C. PARIS a IRWIN, G.,R.. *The stress analysis of cracks handbook*. 3rd ed. New York: ASME Press, c2000. ISBN 0791801535.

Příloha 1: Výsledky modelování seřazeny do přehledných tabulek

Zjednodušený model

Růst trhliny 1 za konstantních délek trhliny 2- parametry B_1 Tabulka 33: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,10$

S/W α_1	4	3	2	1	S/W α_2	4	3	2	1
0,10	-0,327	0,689	1,736	3,207	0,10	3,235	2,235	1,267	0,861
0,15	-0,898	0,298	1,529	3,290	0,10	3,279	2,202	1,154	0,706
0,20	-1,340	0,050	1,475	3,528	0,10	3,367	2,189	1,038	0,513
0,25	-1,726	-0,127	1,508	3,848	0,10	3,499	2,193	0,911	0,268
0,30	-2,086	-0,256	1,609	4,235	0,10	3,680	2,212	0,764	-0,045
0,35	-2,439	-0,345	1,781	4,692	0,10	3,916	2,243	0,588	-0,446
0,40	-2,803	-0,399	2,034	5,241	0,10	4,218	2,287	0,369	-0,961
0,45	-3,196	-0,416	2,388	5,921	0,10	4,603	2,339	0,086	-1,628
0,50	-3,645	-0,395	2,875	6,794	0,10	5,096	2,398	-0,292	-2,504
0,55	-4,187	-0,326	3,550	7,965	0,10	5,735	2,458	-0,816	-3,677
0,60	-4,880	-0,194	4,502	9,604	0,10	6,586	2,508	-1,570	-5,302
0,65	-5,823	0,033	5,896	12,015	0,10	7,761	2,527	-2,708	-7,657
0,70	-7,210	0,418	8,050	15,778	0,10	9,473	2,470	-4,535	-11,292
0,75	-9,454	1,105	11,665	22,154	0,10	12,178	2,228	-7,723	-17,428
0,80	-13,626	2,479	18,583	34,423	0,10	17,030	1,488	-14,055	-29,279
0,85	-23,427	5,916	35,258	64,023	0,10	27,942	-0,939	-29,820	-58,132
0,90	-62,1295	20,398	102,925	183,797	0,10	68,991	-13,267	-95,525	-176,146

Tabulka 34: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,15$

S/W α_1	4	3	2	1	S/W α_2	4	3	2	1
0,10	-0,585	0,511	1,635	3,162	0,15	3,942	2,723	1,539	0,966
0,15	-1,191	0,102	1,426	3,247	0,15	4,016	2,700	1,417	0,781
0,20	-1,674	-0,167	1,372	3,491	0,15	4,147	2,704	1,292	0,552
0,25	-2,110	-0,368	1,406	3,827	0,15	4,336	2,731	1,154	0,261
0,30	-2,533	-0,525	1,514	4,242	0,15	4,592	2,781	0,994	-0,111
0,35	-2,966	-0,649	1,699	4,747	0,15	4,926	2,852	0,799	-0,591
0,40	-3,437	-0,745	1,973	5,374	0,15	5,358	2,947	0,552	-1,213
0,45	-3,975	-0,816	2,365	6,177	0,15	5,916	3,065	0,227	-2,031
0,50	-4,628	-0,864	2,919	7,251	0,15	6,646	3,208	-0,221	-3,127
0,55	-5,467	-0,885	3,711	8,749	0,15	7,625	3,378	-0,862	-4,645
0,60	-6,617	-0,872	4,883	10,949	0,15	8,988	3,578	-1,828	-6,838
0,65	-8,316	-0,807	6,708	14,385	0,15	10,989	3,805	-3,377	-10,211
0,70	-11,076	-0,643	9,792	20,223	0,15	14,180	4,048	-6,083	-15,881
0,75	-16,225	-0,250	15,726	31,494	0,15	19,965	4,249	-11,468	-26,801
0,80	-28,353	0,871	30,094	58,777	0,15	33,133	4,103	-24,927	-53,350
0,85	-76,331	6,117	88,564	169,371	0,15	83,342	0,993	-81,356	-162,053

Tabulka 35: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,20$

$\frac{S}{W}$ α_1	4	3	2	1
0,10	-0,933	0,270	1,499	3,104
0,15	-1,589	-0,166	1,286	3,192
0,20	-2,131	-0,466	1,229	3,447
0,25	-2,640	-0,703	1,264	3,805
0,30	-3,156	-0,904	1,377	4,260
0,35	-3,712	-1,083	1,573	4,832
0,40	-4,349	-1,250	1,872	5,568
0,45	-5,120	-1,415	2,310	6,551
0,50	-6,113	-1,589	2,950	7,921
0,55	-7,475	-1,789	3,910	9,929
0,60	-9,491	-2,041	5,418	13,065
0,65	-12,772	-2,396	7,984	18,395
0,70	-18,899	-2,976	12,949	28,700
0,75	-33,345	-4,165	25,016	53,683
0,80	-90,576	-8,153	74,270	155,065

$\frac{S}{W}$ α_2	4	3	2	1
0,20	4,608	3,184	1,797	1,028
0,20	4,725	3,181	1,672	0,814
0,20	4,914	3,214	1,546	0,549
0,20	5,182	3,280	1,407	0,212
0,20	5,542	3,380	1,244	-0,220
0,20	6,014	3,517	1,042	-0,783
0,20	6,632	3,696	0,779	-1,524
0,20	7,449	3,927	0,419	-2,521
0,20	8,553	4,223	-0,096	-3,902
0,20	10,100	4,609	-0,875	-5,901
0,20	12,391	5,128	-2,131	-8,978
0,20	16,072	5,865	-4,338	-14,151
0,20	22,798	7,016	-8,765	-24,116
0,20	38,239	9,158	-19,922	-48,364
0,20	97,643	15,267	-67,109	-147,820

Tabulka 36: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,25$

$\frac{S}{W}$ α_1	4	3	2	1
0,10	-1,381	-0,040	1,325	3,032
0,15	-2,105	-0,514	1,103	3,127
0,20	-2,729	-0,858	1,040	3,397
0,25	-3,343	-1,149	1,071	3,786
0,30	-3,996	-1,418	1,185	4,296
0,35	-4,737	-1,686	1,390	4,961
0,40	-5,633	-1,971	1,712	5,852
0,45	-6,783	-2,300	2,202	7,094
0,50	-8,362	-2,712	2,951	8,914
0,55	-10,697	-3,280	4,146	11,756
0,60	-14,498	-4,153	6,198	16,587
0,65	-21,601	-5,705	10,195	25,936
0,70	-38,361	-9,201	19,961	48,623
0,75	-104,833	-22,421	59,991	140,782

$\frac{S}{W}$ α_2	4	3	2	1
0,25	5,295	3,662	2,066	1,068
0,25	5,473	3,692	1,946	0,824
0,25	5,745	3,770	1,827	0,521
0,25	6,123	3,896	1,697	0,136
0,25	6,632	4,074	1,541	-0,365
0,25	7,306	4,314	1,343	-1,025
0,25	8,207	4,632	1,075	-1,915
0,25	9,435	5,055	0,690	-3,153
0,25	11,167	5,629	0,102	-4,949
0,25	13,749	6,443	-0,856	-7,718
0,25	17,921	7,677	-2,562	-12,383
0,25	25,595	9,781	-6,029	-21,385
0,25	43,318	14,215	-14,887	-43,333
0,25	111,930	29,543	-52,844	-133,558

Tabulka 37: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,30$

$\frac{S}{W}$ α_1	4	3	2	1
0,10	-1,947	-0,431	1,104	2,945
0,15	-2,762	-0,958	0,868	3,050
0,20	-3,503	-1,367	0,792	3,343
0,25	-4,267	-1,739	0,812	3,775
0,30	-5,124	-2,114	0,918	4,360
0,35	-6,150	-2,524	1,122	5,154
0,40	-7,463	-3,010	1,460	6,266
0,45	-9,260	-3,638	1,999	7,898
0,50	-11,916	-4,523	2,881	10,446
0,55	-16,237	-5,912	4,420	14,780
0,60	-24,316	-8,435	7,450	23,176
0,65	-43,387	-14,238	14,914	43,569
0,70	-119,098	-36,690	45,718	126,509

$\frac{S}{W}$ α_2	4	3	2	1
0,30	6,050	4,190	2,366	1,103
0,30	6,313	4,269	2,259	0,827
0,30	6,702	4,415	2,157	0,484
0,30	7,240	4,630	2,047	0,044
0,30	7,966	4,929	1,915	-0,537
0,30	8,948	5,333	1,738	-1,320
0,30	10,297	5,882	1,483	-2,412
0,30	12,214	6,645	1,089	-4,001
0,30	15,086	7,753	0,430	-6,459
0,30	19,753	9,486	-0,774	-10,612
0,30	28,375	12,544	-3,283	-18,647
0,30	48,385	19,270	-9,843	-38,293
0,30	126,212	43,819	-38,573	-119,289

Růst trhliny 1 za konstantních délek trhliny 2- parametry B2

Tabulka 38: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,10$

S/W α_1	4	3	2	1
0,10	4,948	-2,791	-1,284	-0,779
0,15	1,057	-4,385	-1,086	-0,567
0,20	0,395	-17,826	-0,849	-0,356
0,25	0,173	5,032	-0,626	-0,154
0,30	0,109	1,948	-0,443	0,034
0,35	0,123	1,333	-0,305	0,204
0,40	0,178	1,275	-0,205	0,352
0,45	0,255	1,511	-0,135	0,470
0,50	0,342	2,056	-0,083	0,553
0,55	0,428	3,206	-0,041	0,595
0,60	0,506	6,819	-0,004	0,595
0,65	0,566	-48,809	0,033	0,557
0,70	0,599	-4,648	0,070	0,490
0,75	0,592	-2,031	0,105	0,407
0,80	0,533	-0,993	0,130	0,317
0,85	0,407	-0,414	0,133	0,225
0,90	0,208	-0,091	0,090	0,118

S/W α_2	4	3	2	1
0,10	-0,362	-0,362	-0,358	-0,172
0,10	-0,361	-0,363	-0,364	-0,132
0,10	-0,360	-0,367	-0,371	-0,054
0,10	-0,357	-0,363	-0,382	0,194
0,10	-0,353	-0,362	-0,402	-3,329
0,10	-0,348	-0,361	-0,442	-0,601
0,10	-0,342	-0,359	-0,551	-0,428
0,10	-0,334	-0,357	-1,562	-0,360
0,10	-0,324	-0,354	0,159	-0,319
0,10	-0,311	-0,350	-0,080	-0,289
0,10	-0,296	-0,347	-0,135	-0,262
0,10	-0,278	-0,346	-0,151	-0,236
0,10	-0,254	-0,350	-0,150	-0,209
0,10	-0,225	-0,376	-0,138	-0,178
0,10	-0,186	-0,519	-0,116	-0,142
0,10	-0,135	0,682	-0,084	-0,099
0,10	-0,068	0,029	-0,041	-0,047

Tabulka 39: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,15$

S/W α_1	4	3	2	1
0,10	2,674	-3,693	-1,350	-0,786
0,15	0,745	-12,469	-1,149	-0,569
0,20	0,276	5,113	-0,897	-0,355
0,25	0,106	1,608	-0,657	-0,153
0,30	0,058	0,855	-0,459	0,033
0,35	0,070	0,627	-0,311	0,197
0,40	0,114	0,603	-0,206	0,334
0,45	0,172	0,688	-0,134	0,437
0,50	0,234	0,849	-0,084	0,499
0,55	0,290	1,078	-0,047	0,518
0,60	0,332	1,392	-0,016	0,495
0,65	0,352	1,863	0,011	0,435
0,70	0,344	2,811	0,034	0,350
0,75	0,302	8,437	0,051	0,254
0,80	0,220	-2,706	0,054	0,157
0,85	0,105	-0,403	0,035	0,067

S/W α_2	4	3	2	1
0,15	-0,305	-0,307	-0,304	0,052
0,15	-0,304	-0,308	-0,308	0,150
0,15	-0,302	-0,308	-0,315	0,352
0,15	-0,299	-0,307	-0,325	1,095
0,15	-0,294	-0,305	-0,343	-3,544
0,15	-0,288	-0,303	-0,378	-0,884
0,15	-0,279	-0,299	-0,463	-0,554
0,15	-0,269	-0,294	-0,884	-0,418
0,15	-0,257	-0,288	0,596	-0,337
0,15	-0,241	-0,280	0,051	-0,280
0,15	-0,222	-0,271	-0,037	-0,233
0,15	-0,199	-0,261	-0,064	-0,191
0,15	-0,171	-0,249	-0,068	-0,151
0,15	-0,136	-0,240	-0,060	-0,111
0,15	-0,094	-0,248	-0,043	-0,071
0,15	-0,043	-0,996	-0,020	-0,030

Tabulka 40: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,20$

S/W α_1	4	3	2	1
0,10	1,603	-6,814	-1,455	-0,795
0,15	0,510	7,314	-1,254	-0,573
0,20	0,177	1,719	-0,980	-0,355
0,25	0,051	0,762	-0,712	-0,151
0,30	0,016	0,433	-0,490	0,031
0,35	0,028	0,320	-0,325	0,188
0,40	0,063	0,308	-0,210	0,311
0,45	0,107	0,347	-0,135	0,396
0,50	0,150	0,411	-0,085	0,437
0,55	0,185	0,482	-0,050	0,434
0,60	0,204	0,544	-0,023	0,391
0,65	0,203	0,578	-0,003	0,317
0,70	0,179	0,564	0,012	0,226
0,75	0,129	0,474	0,019	0,132
0,80	0,060	0,275	0,014	0,051

S/W α_2	4	3	2	1
0,20	-0,246	-0,252	-0,251	0,295
0,20	-0,245	-0,252	-0,254	0,473
0,20	-0,243	-0,252	-0,258	0,870
0,20	-0,240	-0,250	-0,266	2,751
0,20	-0,235	-0,248	-0,279	-3,214
0,20	-0,228	-0,244	-0,305	-1,086
0,20	-0,220	-0,239	-0,363	-0,664
0,20	-0,208	-0,231	-0,573	-0,475
0,20	-0,194	-0,222	1,965	-0,361
0,20	-0,177	-0,211	0,142	-0,279
0,20	-0,157	-0,196	0,019	-0,214
0,20	-0,132	-0,177	-0,015	-0,159
0,20	-0,102	-0,154	-0,024	-0,109
0,20	-0,068	-0,122	-0,020	-0,064
0,20	-0,030	-0,075	-0,010	-0,025

Tabulka 41: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,25$

S/W α_1	4	3	2	1
0,10	1,024	45,003	-1,623	-0,807
0,15	0,341	2,243	-1,432	-0,579
0,20	0,102	0,858	-1,128	-0,355
0,25	0,010	0,410	-0,814	-0,150
0,30	-0,013	0,230	-0,549	0,028
0,35	-0,001	0,167	-0,353	0,175
0,40	0,028	0,161	-0,221	0,284
0,45	0,061	0,182	-0,137	0,349
0,50	0,091	0,212	-0,085	0,369
0,55	0,111	0,236	-0,050	0,346
0,60	0,118	0,244	-0,026	0,288
0,65	0,107	0,224	-0,009	0,209
0,70	0,078	0,169	0,001	0,122
0,75	0,037	0,083	0,004	0,045

S/W α_2	4	3	2	1
0,25	-0,186	-0,197	-0,201	0,529
0,25	-0,186	-0,197	-0,202	0,805
0,25	-0,185	-0,196	-0,204	1,480
0,25	-0,183	-0,195	-0,209	6,594
0,25	-0,179	-0,192	-0,217	-2,835
0,25	-0,172	-0,187	-0,233	-1,162
0,25	-0,164	-0,181	-0,267	-0,714
0,25	-0,153	-0,172	-0,373	-0,497
0,25	-0,139	-0,161	-2,155	-0,361
0,25	-0,122	-0,147	0,203	-0,263
0,25	-0,101	-0,129	0,045	-0,186
0,25	-0,077	-0,106	0,007	-0,122
0,25	-0,050	-0,076	-0,004	-0,068
0,25	-0,022	-0,039	-0,004	-0,025

Tabulka 42: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,30$

S/W α_1	4	3	2	1
0,10	0,678	3,985	-1,914	-0,824
0,15	0,220	1,127	-1,774	-0,586
0,20	0,047	0,484	-1,435	-0,356
0,25	-0,019	0,228	-1,033	-0,150
0,30	-0,033	0,121	-0,678	0,024
0,35	-0,020	0,084	-0,417	0,159
0,40	0,004	0,082	-0,248	0,251
0,45	0,030	0,095	-0,146	0,296
0,50	0,051	0,110	-0,086	0,296
0,55	0,063	0,117	-0,049	0,258
0,60	0,061	0,109	-0,026	0,192
0,65	0,047	0,083	-0,010	0,115
0,70	0,022	0,039	-0,002	0,043

S/W α_2	4	3	2	1
0,30	-0,126	-0,143	-0,155	0,727
0,30	-0,128	-0,144	-0,155	1,104
0,30	-0,129	-0,144	-0,155	2,138
0,30	-0,128	-0,143	-0,157	26,850
0,30	-0,126	-0,140	-0,161	-2,470
0,30	-0,121	-0,136	-0,168	-1,133
0,30	-0,114	-0,129	-0,186	-0,699
0,30	-0,104	-0,120	-0,235	-0,473
0,30	-0,091	-0,108	-0,536	-0,329
0,30	-0,076	-0,093	0,257	-0,224
0,30	-0,058	-0,074	0,048	-0,142
0,30	-0,037	-0,051	0,011	-0,077
0,30	-0,016	-0,024	0,001	-0,028

Růst trhliny 2 za konstantních délek trhliny 1- parametry B_1

Tabulka 43: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,10$

S/W α_1	4	3	2	1
0,10	-0,327	0,689	1,736	3,207
0,10	-0,585	0,511	1,635	3,162
0,10	-0,933	0,270	1,499	3,104
0,10	-1,381	-0,040	1,325	3,032
0,10	-1,947	-0,431	1,104	2,945
0,10	-2,658	-0,924	0,825	2,841
0,10	-3,558	-1,550	0,471	2,714
0,10	-4,713	-2,355	0,013	2,558
0,10	-6,220	-3,408	-0,590	2,359
0,10	-8,236	-4,823	-1,406	2,094
0,10	-11,023	-6,786	-2,546	1,726
0,10	-15,048	-9,631	-4,213	1,184
0,10	-21,217	-14,009	-6,801	0,323
0,10	-31,524	-21,354	-11,185	-1,180
0,10	-51,190	-35,427	-19,664	-4,196
0,10	-98,509	-69,433	-40,358	-11,855
0,10	-290,199	-207,821	-125,444	-44,711

S/W α_2	4	3	2	1
0,10	3,235	2,235	1,267	0,861
0,15	3,942	2,723	1,539	0,966
0,20	4,608	3,184	1,797	1,028
0,25	5,295	3,662	2,066	1,068
0,30	6,050	4,190	2,366	1,103
0,35	6,915	4,800	2,716	1,147
0,40	7,942	5,527	3,139	1,213
0,45	9,201	6,422	3,665	1,319
0,50	10,795	7,559	4,341	1,482
0,55	12,881	9,053	5,236	1,734
0,60	15,726	11,094	6,469	2,122
0,65	19,802	14,024	8,250	2,727
0,70	26,034	18,511	10,991	3,713
0,75	36,449	26,022	15,596	5,436
0,80	56,348	40,396	24,444	8,841
0,85	104,231	75,039	45,848	17,253
0,90	297,630	215,206	132,783	52,011

Tabulka 44: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,15$

S/W α_1	4	3	2	1
0,15	-0,922	0,298	1,529	3,290
0,15	-1,191	0,102	1,426	3,247
0,15	-1,589	-0,166	1,286	3,192
0,15	-2,105	-0,514	1,103	3,127
0,15	-2,762	-0,958	0,868	3,050
0,15	-3,601	-1,526	0,567	2,961
0,15	-4,679	-2,259	0,176	2,855
0,15	-6,091	-3,222	-0,341	2,726
0,15	-7,984	-4,518	-1,043	2,560
0,15	-10,606	-6,320	-2,029	2,331
0,15	-14,398	-8,939	-3,477	1,993
0,15	-20,223	-12,980	-5,736	1,447
0,15	-29,976	-19,779	-9,582	0,467
0,15	-48,627	-32,845	-17,062	-1,563
0,15	-93,586	-64,499	-35,412	-6,891
0,15	-275,982	-193,600	-111,219	-30,480

S/W α_2	4	3	2	1
0,10	3,301	2,202	1,154	0,706
0,15	4,016	2,700	1,417	0,781
0,20	4,725	3,181	1,672	0,814
0,25	5,473	3,692	1,946	0,824
0,30	6,313	4,269	2,259	0,827
0,35	7,300	4,952	2,633	0,838
0,40	8,504	5,788	3,098	0,871
0,45	10,024	6,849	3,693	0,944
0,50	12,014	8,241	4,485	1,081
0,55	14,728	10,147	5,577	1,315
0,60	18,617	12,884	7,159	1,709
0,65	24,563	17,079	9,598	2,381
0,70	34,497	24,100	13,706	3,592
0,75	53,467	37,536	21,605	6,035
0,80	99,089	69,910	40,731	12,155
0,85	283,310	200,891	118,473	37,707

Tabulka 45: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,20$

S/W α_1	4	3	2	1
0,20	-1,340	0,050102	1,475	3,528
0,20	-1,674	-0,16741	1,372	3,491
0,20	-2,131	-0,46592	1,229	3,447
0,20	-2,729	-0,85795	1,040	3,397
0,20	-3,503	-1,36651	0,792	3,343
0,20	-4,506	-2,02863	0,467	3,286
0,20	-5,825	-2,90291	0,034	3,222
0,20	-7,598	-4,08394	-0,558	3,149
0,20	-10,059	-5,73136	-1,395	3,053
0,20	-13,628	-8,13186	-2,630	2,911
0,20	-19,120	-11,8465	-4,570	2,670
0,20	-28,334	-18,1132	-7,890	2,200
0,20	-45,987	-30,1877	-14,387	1,141
0,20	-88,607	-59,5104	-30,413	-1,876
0,20	-261,739	-179,353	-96,967	-16,222

S/W α_2	4	3	2	1
0,10	3,367	2,189	1,038	0,513
0,15	4,147	2,704	1,292	0,552
0,20	4,914	3,214	1,546	0,549
0,25	5,745	3,770	1,827	0,521
0,30	6,702	4,415	2,157	0,484
0,35	7,858	5,197	2,564	0,452
0,40	9,310	6,185	3,083	0,439
0,45	11,206	7,480	3,773	0,462
0,50	13,790	9,251	4,726	0,546
0,55	17,492	11,796	6,110	0,729
0,60	23,149	15,696	8,250	1,088
0,65	32,597	22,225	11,857	1,786
0,70	50,630	34,717	18,806	3,265
0,75	93,984	64,816	35,648	7,089
0,80	269,015	186,599	104,183	23,424

Tabulka 46: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,25$

S/W α_1	4	3	2	1
0,25	-1,726	-0,127	1,508	3,848
0,25	-2,110	-0,368	1,406	3,827
0,25	-2,640	-0,703	1,264	3,805
0,25	-3,343	-1,149	1,071	3,786
0,25	-4,267	-1,739	0,812	3,775
0,25	-5,492	-2,524	0,462	3,776
0,25	-7,147	-3,592	-0,021	3,792
0,25	-9,451	-5,087	-0,711	3,826
0,25	-12,801	-7,273	-1,737	3,876
0,25	-17,966	-10,667	-3,361	3,934
0,25	-26,650	-16,408	-6,163	3,969
0,25	-43,314	-27,499	-11,683	3,872
0,25	-83,607	-54,501	-25,395	3,158
0,25	-247,485	-165,096	-82,707	-1,956

S/W α_2	4	3	2	1
0,10	3,499	2,193	0,911	0,268
0,15	4,336	2,731	1,154	0,261
0,20	5,182	3,280	1,407	0,212
0,25	6,123	3,896	1,697	0,136
0,30	7,240	4,630	2,047	0,044
0,35	8,629	5,549	2,493	-0,052
0,40	10,435	6,749	3,083	-0,138
0,45	12,890	8,387	3,900	-0,204
0,50	16,404	10,739	5,086	-0,230
0,55	21,770	14,343	6,924	-0,186
0,60	30,727	20,376	10,031	-0,001
0,65	47,818	31,920	16,025	0,511
0,70	88,896	59,737	30,579	2,035
0,75	254,723	172,312	89,900	9,146

Tabulka 47: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,30$

S/W α_1	4	3	2	1
0,30	-2,086	-0,256	1,609	4,235
0,30	-2,533	-0,525	1,514	4,242
0,30	-3,156	-0,904	1,377	4,260
0,30	-3,996	-1,418	1,185	4,296
0,30	-5,124	-2,114	0,918	4,360
0,30	-6,659	-3,067	0,543	4,465
0,30	-8,807	-4,411	0,000	4,626
0,30	-11,939	-6,385	-0,820	4,865
0,30	-16,782	-9,460	-2,131	5,219
0,30	-24,939	-14,680	-4,416	5,755
0,30	-40,621	-24,794	-8,965	6,617
0,30	-78,594	-49,481	-20,366	8,201
0,30	-233,227	-150,835	-68,442	12,314

S/W α_2	4	3	2	1
0,10	3,680	2,212	0,764	-0,045
0,15	4,592	2,781	0,994	-0,111
0,20	5,542	3,380	1,244	-0,220
0,25	6,632	4,074	1,541	-0,365
0,30	7,966	4,929	1,915	-0,537
0,35	9,687	6,036	2,407	-0,730
0,40	12,015	7,542	3,087	-0,943
0,45	15,341	9,702	4,077	-1,178
0,50	20,414	13,009	5,613	-1,448
0,55	28,878	18,544	8,217	-1,778
0,60	45,022	29,137	13,255	-2,234
0,65	83,819	54,667	25,517	-3,012
0,70	240,437	158,029	75,621	-5,127

Růst trhliny 2 za konstantních délek trhliny 1- parametry B2

Tabulka 48: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,10$

S/W α_1	4	3	2	1
0,10	4,948	-2,791	-1,284	-0,779
0,10	2,674	-3,693	-1,350	-0,786
0,10	1,603	-6,814	-1,455	-0,795
0,10	1,024	45,003	-1,623	-0,807
0,10	0,678	3,985	-1,914	-0,824
0,10	0,455	1,775	-2,508	-0,845
0,10	0,304	1,001	-4,291	-0,875
0,10	0,199	0,616	-154,029	-0,918
0,10	0,123	0,391	3,209	-0,983
0,10	0,070	0,249	1,293	-1,090
0,10	0,032	0,154	0,678	-1,301
0,10	0,007	0,090	0,385	-1,861
0,10	-0,009	0,047	0,221	-6,673
0,10	-0,017	0,020	0,121	1,776
0,10	-0,018	0,004	0,060	0,483
0,10	-0,014	-0,003	0,024	0,164
0,10	-0,00664	-0,003	0,006	0,041

S/W α_2	4	3	2	1
0,10	-0,362	-0,362	-0,358	-0,172
0,15	-0,305	-0,307	-0,304	0,052
0,20	-0,246	-0,252	-0,251	0,295
0,25	-0,186	-0,197	-0,201	0,529
0,30	-0,126	-0,143	-0,155	0,727
0,35	-0,067	-0,090	-0,114	0,862
0,40	-0,010	-0,039	-0,076	0,918
0,45	0,044	0,009	-0,042	0,888
0,50	0,092	0,053	-0,011	0,781
0,55	0,132	0,090	0,014	0,618
0,60	0,162	0,118	0,034	0,430
0,65	0,178	0,135	0,048	0,246
0,70	0,177	0,137	0,052	0,090
0,75	0,158	0,123	0,047	-0,022
0,80	0,122	0,095	0,034	-0,083
0,85	0,075	0,056	0,015	-0,093
0,90	0,028	0,019	0,001	-0,056

Tabulka 49: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,15$

S/W α_1	4	3	2	1
0,15	1,022	-4,385	-1,086	-0,567
0,15	0,745	-12,469	-1,149	-0,569
0,15	0,510	7,314	-1,254	-0,573
0,15	0,341	2,243	-1,432	-0,579
0,15	0,220	1,127	-1,774	-0,586
0,15	0,135	0,652	-2,636	-0,596
0,15	0,073	0,398	-8,193	-0,610
0,15	0,030	0,245	4,060	-0,630
0,15	0,000	0,146	1,262	-0,661
0,15	-0,020	0,082	0,610	-0,713
0,15	-0,032	0,039	0,329	-0,819
0,15	-0,036	0,012	0,181	-1,102
0,15	-0,035	-0,003	0,095	-3,325
0,15	-0,029	-0,009	0,045	0,960
0,15	-0,019	-0,009	0,017	0,209
0,15	-0,008	-0,005	0,003	0,045

S/W α_2	4	3	2	1
0,10	-0,361	-0,363	-0,364	-0,132
0,15	-0,304	-0,308	-0,308	0,150
0,20	-0,245	-0,252	-0,254	0,473
0,25	-0,186	-0,197	-0,202	0,805
0,30	-0,128	-0,144	-0,155	1,104
0,35	-0,072	-0,092	-0,112	1,325
0,40	-0,019	-0,044	-0,074	1,424
0,45	0,028	0,000	-0,042	1,372
0,50	0,069	0,037	-0,015	1,179
0,55	0,100	0,067	0,006	0,893
0,60	0,120	0,087	0,021	0,580
0,65	0,126	0,095	0,029	0,302
0,70	0,117	0,090	0,029	0,096
0,75	0,094	0,072	0,022	-0,025
0,80	0,060	0,045	0,012	-0,068
0,85	0,023	0,017	0,002	-0,047

Tabulka 50: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,20$

S/W α_1	4	3	2	1
0,20	0,395	-17,826	-0,849	-0,356
0,20	0,276	5,113	-0,897	-0,355
0,20	0,177	1,719	-0,980	-0,355
0,20	0,102	0,858	-1,128	-0,355
0,20	0,047	0,484	-1,435	-0,356
0,20	0,008	0,284	-2,343	-0,358
0,20	-0,019	0,165	-30,937	-0,361
0,20	-0,037	0,090	1,774	-0,365
0,20	-0,046	0,042	0,664	-0,372
0,20	-0,050	0,012	0,324	-0,385
0,20	-0,048	-0,006	0,168	-0,412
0,20	-0,043	-0,014	0,084	-0,490
0,20	-0,033	-0,016	0,038	-0,919
0,20	-0,021	-0,012	0,013	0,539
0,20	-0,009	-0,006	0,003	0,059

S/W α_2	4	3	2	1
0,10	-0,360	-0,367	-0,371	-0,054
0,15	-0,302	-0,308	-0,315	0,352
0,20	-0,243	-0,252	-0,258	0,870
0,25	-0,185	-0,196	-0,204	1,480
0,30	-0,129	-0,144	-0,155	2,138
0,35	-0,076	-0,094	-0,111	2,749
0,40	-0,028	-0,049	-0,074	3,136
0,45	0,014	-0,009	-0,044	3,093
0,50	0,047	0,023	-0,020	2,562
0,55	0,071	0,046	-0,002	1,757
0,60	0,083	0,059	0,009	0,989
0,65	0,082	0,061	0,013	0,433
0,70	0,069	0,052	0,012	0,111
0,75	0,046	0,035	0,007	-0,025
0,80	0,019	0,014	0,001	-0,039

Tabulka 51: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,25$

S/W α_1	4	3	2	1
0,25	0,173	5,032	-0,626	-0,154
0,25	0,106	1,608	-0,657	-0,153
0,25	0,051	0,762	-0,712	-0,151
0,25	0,010	0,410	-0,814	-0,150
0,25	-0,019	0,228	-1,033	-0,150
0,25	-0,039	0,124	-1,736	-0,150
0,25	-0,050	0,061	35,500	-0,150
0,25	-0,055	0,022	0,999	-0,150
0,25	-0,055	-0,001	0,376	-0,150
0,25	-0,051	-0,014	0,175	-0,149
0,25	-0,043	-0,018	0,083	-0,148
0,25	-0,033	-0,017	0,036	-0,151
0,25	-0,021	-0,013	0,012	-0,183
0,25	-0,009	-0,006	0,002	0,286

S/W α_2	4	3	2	1
0,10	-0,357	-0,363	-0,382	0,194
0,15	-0,299	-0,307	-0,325	1,095
0,20	-0,240	-0,250	-0,266	2,751
0,25	-0,183	-0,195	-0,209	6,594
0,30	-0,128	-0,143	-0,157	26,850
0,35	-0,078	-0,094	-0,112	-26,872
0,40	-0,034	-0,052	-0,074	-11,006
0,45	0,002	-0,017	-0,045	-7,715
0,50	0,030	0,010	-0,023	-6,656
0,55	0,047	0,028	-0,008	-7,532
0,60	0,053	0,036	0,000	-1035,32
0,65	0,048	0,035	0,003	1,638
0,70	0,034	0,025	0,002	0,192
0,75	0,014	0,010	0,000	-0,021

Tabulka 52: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,30$

S/W α_1	4	3	2	1
0,30	0,109	1,948	-0,443	0,034
0,30	0,058	0,855	-0,459	0,033
0,30	0,016	0,433	-0,490	0,031
0,30	-0,013	0,230	-0,549	0,028
0,30	-0,033	0,121	-0,678	0,024
0,30	-0,045	0,057	-1,089	0,018
0,30	-0,050	0,020	1184,1	0,011
0,30	-0,050	-0,002	0,626	0,004
0,30	-0,046	-0,013	0,219	-0,002
0,30	-0,039	-0,017	0,093	-0,008
0,30	-0,029	-0,016	0,038	-0,011
0,30	-0,019	-0,011	0,013	-0,012
0,30	-0,008	-0,005	0,003	-0,009

S/W α_2	4	3	2	1
0,10	-0,353	-0,362	-0,402	-3,329
0,15	-0,294	-0,305	-0,343	-3,544
0,20	-0,235	-0,248	-0,279	-3,214
0,25	-0,179	-0,192	-0,217	-2,835
0,30	-0,126	-0,140	-0,161	-2,470
0,35	-0,079	-0,093	-0,113	-2,122
0,40	-0,038	-0,053	-0,074	-1,791
0,45	-0,007	-0,022	-0,045	-1,472
0,50	0,016	0,001	-0,025	-1,162
0,55	0,028	0,015	-0,012	-0,861
0,60	0,030	0,020	-0,004	-0,571
0,65	0,023	0,016	-0,002	-0,303
0,70	0,011	0,007	-0,001	-0,084

Reálný model

Růst trhliny 1 za konstantních délek trhliny 2

Tabulka 53: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2 = 0,10$

α_1	α_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$	$B_2(T_1)$	$B_2(T_2)$
0,10	0,10	1,526	0,880	-1,029	-1,050
0,15	0,10	1,762	0,770	0,045	-1,079
0,20	0,10	1,839	0,631	0,738	-1,133
0,25	0,10	1,941	0,468	0,963	-1,245
0,30	0,10	2,112	0,276	0,920	-1,565
0,35	0,10	2,365	0,043	0,796	-5,927
0,40	0,10	2,715	-0,249	0,681	0,180
0,45	0,10	3,187	-0,627	0,608	-0,342
0,50	0,10	3,821	-1,130	0,587	-0,477
0,55	0,10	4,683	-1,823	0,621	-0,523
0,60	0,10	5,887	-2,813	0,708	-0,531
0,65	0,10	7,636	-4,294	0,844	-0,516
0,70	0,10	10,326	-6,648	1,018	-0,480
0,75	0,10	14,824	-10,717	1,198	-0,427
0,80	0,10	23,409	-18,723	1,323	-0,351
0,85	0,10	44,058	-38,487	1,266	-0,250
0,90	0,10	127,683	-120,205	0,827	-0,121

Tabulka 54: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2 = 0,15$

α_1	α_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$	$B_2(T_1)$	$B_2(T_2)$
0,10	0,15	1,465	1,086	-1,012	-1,089
0,15	0,15	1,693	0,963	0,090	-1,119
0,20	0,15	1,775	0,807	0,795	-1,177
0,25	0,15	1,887	0,624	1,012	-1,295
0,30	0,15	2,075	0,406	0,951	-1,597
0,35	0,15	2,354	0,137	0,804	-3,379
0,40	0,15	2,746	-0,206	0,663	1,189
0,45	0,15	3,283	-0,659	0,561	-0,031
0,50	0,15	4,023	-1,278	0,507	-0,272
0,55	0,15	5,065	-2,157	0,493	-0,352
0,60	0,15	6,590	-3,468	0,515	-0,370
0,65	0,15	8,948	-5,546	0,566	-0,355
0,70	0,15	12,912	-9,132	0,621	-0,314
0,75	0,15	20,513	-16,189	0,644	-0,253
0,80	0,15	38,858	-33,640	0,578	-0,173
0,85	0,15	113,298	-106,062	0,344	-0,078

Tabulka 55: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2 = 0,20$

α_1	α_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$	$B_2(T_1)$	$B_2(T_2)$
0,10	0,20	1,382	1,285	-0,987	-1,022
0,15	0,20	1,599	1,155	0,155	-1,042
0,20	0,20	1,684	0,990	0,881	-1,087
0,25	0,20	1,808	0,794	1,087	-1,181
0,30	0,20	2,015	0,557	0,998	-1,409
0,35	0,20	2,328	0,258	0,820	-2,359
0,40	0,20	2,772	-0,132	0,650	3,078
0,45	0,20	3,396	-0,663	0,520	0,243
0,50	0,20	4,287	-1,416	0,432	-0,097
0,55	0,20	5,599	-2,539	0,382	-0,199
0,60	0,20	7,640	-4,323	0,360	-0,225
0,65	0,20	11,088	-7,409	0,353	-0,211
0,70	0,20	17,720	-13,506	0,339	-0,173
0,75	0,20	33,767	-28,649	0,286	-0,117
0,80	0,20	98,996	-91,823	0,162	-0,052

Tabulka 56: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2 = 0,25$

α_1	α_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$	$B_2(T_1)$	$B_2(T_2)$
0,10	0,25	1,274	1,495	-0,952	-0,881
0,15	0,25	1,474	1,363	0,252	-0,885
0,20	0,25	1,561	1,194	1,007	-0,908
0,25	0,25	1,696	0,991	1,197	-0,964
0,30	0,25	1,926	0,740	1,070	-1,102
0,35	0,25	2,276	0,416	0,851	-1,585
0,40	0,25	2,786	-0,023	0,644	21,245
0,45	0,25	3,526	-0,645	0,483	0,412
0,50	0,25	4,629	-1,576	0,368	0,005
0,55	0,25	6,358	-3,060	0,290	-0,100
0,60	0,25	9,292	-5,644	0,239	-0,124
0,65	0,25	14,958	-10,780	0,200	-0,111
0,70	0,25	28,706	-23,621	0,154	-0,077
0,75	0,25	84,714	-77,561	0,082	-0,035

Tabulka 57: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2 = 0,30$

α_1	α_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$	$B_2(T_1)$	$B_2(T_2)$
0,10	0,30	1,136	1,731	-0,898	-0,693
0,15	0,30	1,312	1,602	0,400	-0,680
0,20	0,30	1,398	1,435	1,203	-0,678
0,25	0,30	1,542	1,232	1,368	-0,696
0,30	0,30	1,793	0,974	1,182	-0,755
0,35	0,30	2,185	0,629	0,902	-0,957
0,40	0,30	2,775	0,138	0,648	-3,241
0,45	0,30	3,669	-0,598	0,452	0,449
0,50	0,30	5,086	-1,782	0,311	0,030
0,55	0,30	7,508	-3,863	0,214	-0,054
0,60	0,30	12,208	-8,038	0,147	-0,066
0,65	0,30	23,655	-18,581	0,095	-0,050
0,70	0,30	70,439	-63,293	0,044	-0,025

Růst trhliny 2 za konstantních délek trhliny 1

Tabulka 58: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,10$

α_1	α_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$	$B_2(T_1)$	$B_2(T_2)$
0,10	0,10	1,526	0,880	-1,029	-1,050
0,10	0,15	1,465	1,086	-1,012	-1,089
0,10	0,20	1,382	1,285	-0,987	-1,022
0,10	0,25	1,274	1,495	-0,952	-0,881
0,10	0,30	1,136	1,731	-0,898	-0,693
0,10	0,35	0,959	2,009	-0,814	-0,477
0,10	0,40	0,731	2,348	-0,653	-0,244
0,10	0,45	0,433	2,775	-0,208	-0,006
0,10	0,50	0,034	3,327	12,213	0,238
0,10	0,55	-0,517	4,066	-2,081	0,494
0,10	0,60	-1,304	5,091	-1,518	0,766
0,10	0,65	-2,486	6,580	-1,307	1,074
0,10	0,70	-4,376	8,875	-1,168	1,438
0,10	0,75	-7,682	12,722	-1,038	1,877
0,10	0,80	-14,281	20,063	-0,890	2,372
0,10	0,85	-30,826	37,656	-0,690	2,750
0,10	0,90	-100,005	108,643	-0,390	2,351

Tabulka 59: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,15$

α_1	α_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$	$B_2(T_1)$	$B_2(T_2)$
0,15	0,10	1,762	0,770	0,045	-1,079
0,15	0,15	1,693	0,963	0,090	-1,119
0,15	0,20	1,599	1,155	0,155	-1,042
0,15	0,25	1,474	1,363	0,252	-0,885
0,15	0,30	1,312	1,602	0,400	-0,680
0,15	0,35	1,102	1,889	0,649	-0,450
0,15	0,40	0,826	2,247	1,154	-0,213
0,15	0,45	0,458	2,710	2,738	0,018
0,15	0,50	-0,048	3,328	-33,862	0,238
0,15	0,55	-0,768	4,186	-2,786	0,445
0,15	0,60	-1,838	5,434	-1,529	0,634
0,15	0,65	-3,532	7,365	-1,056	0,806
0,15	0,70	-6,457	10,622	-0,781	0,956
0,15	0,75	-12,230	16,889	-0,571	1,056
0,15	0,80	-26,571	32,064	-0,378	1,033
0,15	0,85	-86,411	93,822	-0,175	0,707

Tabulka 60: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,20$

α_1	α_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$	$B_2(T_1)$	$B_2(T_2)$
0,20	0,10	1,839	0,631	0,738	-1,133
0,20	0,15	1,775	0,807	0,795	-1,177
0,20	0,20	1,684	0,990	0,881	-1,087
0,20	0,25	1,561	1,194	1,007	-0,908
0,20	0,30	1,398	1,435	1,203	-0,678
0,20	0,35	1,179	1,734	1,538	-0,430
0,20	0,40	0,884	2,118	2,238	-0,186
0,20	0,45	0,474	2,631	4,600	0,038
0,20	0,50	-0,112	3,345	-21,759	0,234
0,20	0,55	-0,991	4,387	-2,797	0,393
0,20	0,60	-2,389	6,004	-1,343	0,512
0,20	0,65	-4,818	8,744	-0,789	0,584
0,20	0,70	-9,633	14,037	-0,480	0,593
0,20	0,75	-21,665	26,910	-0,270	0,514
0,20	0,80	-72,237	79,470	-0,107	0,303

Tabulka 61: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,25$

α_1	α_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$	$B_2(T_1)$	$B_2(T_2)$
0,25	0,10	1,941	0,468	0,963	-1,245
0,25	0,15	1,887	0,624	1,012	-1,295
0,25	0,20	1,808	0,794	1,087	-1,181
0,25	0,25	1,696	0,991	1,197	-0,964
0,25	0,30	1,542	1,232	1,368	-0,696
0,25	0,35	1,328	1,541	1,662	-0,419
0,25	0,40	1,024	1,953	2,267	-0,162
0,25	0,45	0,582	2,528	4,236	0,057
0,25	0,50	-0,092	3,370	-28,628	0,228
0,25	0,55	-1,181	4,683	-2,423	0,345
0,25	0,60	-3,096	6,917	-1,017	0,404
0,25	0,65	-6,941	11,251	-0,508	0,400
0,25	0,70	-16,662	21,830	-0,243	0,325
0,25	0,75	-57,988	65,177	-0,083	0,172

Tabulka 62: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,30$

α_1	α_2	$B_1(K_1)$	$B_1(K_2)$	$B_2(T_1)$	$B_2(T_2)$
0,30	0,10	2,112	0,276	0,920	-1,565
0,30	0,15	2,075	0,406	0,951	-1,597
0,30	0,20	2,015	0,557	0,998	-1,409
0,30	0,25	1,926	0,740	1,070	-1,102
0,30	0,30	1,793	0,974	1,182	-0,755
0,30	0,35	1,597	1,287	1,371	-0,422
0,30	0,40	1,299	1,724	1,750	-0,138
0,30	0,45	0,831	2,368	2,858	0,081
0,30	0,50	0,054	3,378	46,392	0,227
0,30	0,55	-1,347	5,107	-1,971	0,301
0,30	0,60	-4,222	8,483	-0,676	0,305
0,30	0,65	-11,635	16,768	-0,268	0,242
0,30	0,70	-43,725	50,897	-0,080	0,121

Seznam obrázků

Obrázek 1: Mody zatížení tělesa s trhlinou [2]	13
Obrázek 2: Schéma soupravy používané pro test tříbodového ohybu s jednostranným vrubem [4]	14
Obrázek 3: Statické schéma testu [6]	15
Obrázek 4: Zázornění přípravy štípacího testu [8]	16
Obrázek 5: Geometrie štípacího testu [9] [10]	17
Obrázek 6: Geometrie netradičního štípacího testu [10]	18
Obrázek 7: Příklad využití extrapolací metody [13]	19
Obrázek 8: Integrační křivka kolem vrcholu trhliny [14]	20
Obrázek 9: Geometrie konečných prvků využívaných elementem PLANE183 [17]	21
Obrázek 10: Nastavení typu elementu [16]	21
Obrázek 11: Nastavení materiálového modelu [16]	22
Obrázek 12: Nastavení parametrů elementu [16]	22
Obrázek 13: Nastavení materiálových charakteristik [16]	22
Obrázek 14: Modelování sítě v okolí kořene trhliny [16]	23
Obrázek 15: Numerický model tělesa [16]	24
Obrázek 16: Demonstrace deformace tělesa pro $\alpha = 0,1$ (nahore) a $0,9$ (dolů) [16]	25
Obrázek 17: Schéma geometrie tělesa s oboustrannou trhlinou při tahovém zatížení	26
Obrázek 18: Numerický model tělesa [16]	27
Obrázek 19: Aplikace zatížení na model [16]	27
Obrázek 20: Demonstrace deformace tělesa vlivem zatížení při $\alpha = 0,5$ [16]	27
Obrázek 21: Numerický model tělesa se zatížením [16]	28
Obrázek 22: Demonstrace deformace tělesa vlivem zatížení při $\alpha = 0,1$ (nahore) a $0,8$ (dolů) [16]	29
Obrázek 23: Numerický model tělesa se zatížením; $S/W=3$ [16]	31
Obrázek 24: Numerický model tělesa s velikostí prvků sítě [16]	31
Obrázek 25: Předpokládaná deformace tělesa; poměr α pro obě trhliny $0,25$ [16]	32
Obrázek 26: Závislost parametru $B_1(\alpha)$ pro tříbodový ohyb	34
Obrázek 27: Závislost parametru $B_2(\alpha)$ pro tříbodový ohyb	35
Obrázek 28: Závislost parametru $B_1(\alpha)$ pro tahovou zkoušku	37

Obrázek 29: Závislost parametru $B_2(\alpha)$ pro tahovou zkoušku	38
Obrázek 30: Závislost parametru $B_1(\alpha)$ pro štípací test.	40
Obrázek 31: Závislost parametru $B_2(\alpha)$ pro štípací test.	41
.....	43
Obrázek 32: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro současný růst trhlin pro modifikovaný štípací test.....	43
Obrázek 33: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro současný růst trhlin pro modifikovaný štípací test.....	46
Obrázek 34: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,1$	48
Obrázek 35: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,15$	49
Obrázek 36: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,20$	49
Obrázek 37: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,25$	50
Obrázek 38: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,30$	50
Obrázek 39: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,10$	52
Obrázek 40: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,15$	53
Obrázek 41: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,20$	53
Obrázek 42: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,25$	54
Obrázek 43: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2; $\alpha_2=0,30$	54
Obrázek 44: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,1$	57
Obrázek 45: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,15$	57
Obrázek 46: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,20$	58

Obrázek 47: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,25$	58
Obrázek 48: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,30$	59
Obrázek 49: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,10$	61
Obrázek 50: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,15$	61
Obrázek 51: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,20$	62
Obrázek 52: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,25$	62
Obrázek 53: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro růst trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1; $\alpha_1=0,30$	63
Obrázek 54: Geometrie zkušebního tělesa [10]	66
Obrázek 55: Numerický model tělesa se zatížením	67
Obrázek 56: Grafické znázornění faktoru intenzity napětí pro současný růst trhlin	69
Obrázek 57: Grafické znázornění T -napětí pro současný růst trhlin	69
Obrázek 58: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha)$ pro současný růst trhlin	70
Obrázek 59: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha)$ pro současný růst trhlin	70
Obrázek 60: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha_1)$ pro trhlinu 1 při růstu trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2	72
Obrázek 61: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha_1)$ pro trhlinu 2 při růstu trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2	72
Obrázek 62: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha_1)$ pro trhlinu 1 při růstu trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2	74
Obrázek 63: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha_1)$ pro trhlinu 2 při růstu trhliny 1 při konstantní délce trhliny 2	74
Obrázek 64: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha_2)$ pro trhlinu 1 při růstu trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1	76
Obrázek 65: Grafické znázornění parametru $B_1(\alpha_2)$ pro trhlinu 2 při růstu trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1	76
Obrázek 66: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha_2)$ pro trhlinu 1 při růstu trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1	78

Obrázek 67: Grafické znázornění parametru $B_2(\alpha_2)$ pro trhlinu 2 při růstu trhliny 2 při konstantní délce trhliny 1	78
Obrázek 68: Demonstrace deformace tělesa při rovnajících se hodnotách parametrů	81
Obrázek 69: Výsledné napětí v trhlíně 1 na úrovni uzlů	82
Obrázek 70: Výsledné napětí v trhlíně 1 na úrovni prvků sítě	82
Obrázek 71: Výsledné napětí v trhlíně 2 na úrovni uzlů	83
Obrázek 72: Výsledné napětí v trhlíně 2 na úrovni prvků sítě	83

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání parametru K z numerické analýzy s analytickým výpočtem pomocí tabulek	33
Tabulka 2: Porovnání parametrů K z numerické analýzy s analytickým výpočtem pomocí tabulek	33
Tabulka 3: Porovnání parametrů B_1, B_2 pro třibodový ohyb získaných pomocí numerické analýzy s tabulkovými hodnotami	34
Tabulka 4: Výsledné hodnoty parametrů pro tahovou zkoušku z numerického modelování a jejich porovnání	36
Tabulka 5: Výsledné hodnoty parametrů B_1, B_2 z numerického modelování	39
Tabulka 6: Výsledné hodnoty parametrů B_1 pro trhlinu 1 z numerického modelování	42
Tabulka 7: Výsledné hodnoty parametrů B_1 pro trhlinu 2 z numerického modelování	42
Tabulka 8: Výsledné hodnoty parametrů B_2 pro trhlinu 1 z numerického modelování	45
Tabulka 9: Výsledné hodnoty parametrů B_2 pro trhlinu 2 z numerického modelování	45
Tabulka 10: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin	47
Tabulka 11: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,10$	56
Tabulka 12: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,15$	56
Tabulka 13: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,20$	56
Tabulka 14: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,25$	56
Tabulka 15: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,30$	56
Tabulka 16: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,10$	64
Tabulka 17: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,20$	64
Tabulka 18: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,25$	64
Tabulka 19: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,30$	65
Tabulka 20: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,10$	65
Tabulka 21: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,15$	65
Tabulka 22: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,20$	65
Tabulka 23: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,25$	65
Tabulka 24: Výsledné hodnoty parametrů z numerického modelování	68
Tabulka 25: Hodnoty parametrů B_1 a B_2 pro současný růst obou trhlin	68
Tabulka 26: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,25$	80

Tabulka 27: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_2=0,30$	80
Tabulka 28: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,10$	80
Tabulka 29: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,15$	80
Tabulka 30: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,20$	80
Tabulka 31: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,25$	81
Tabulka 32: Nalezení přibližujících se hodnot obou trhlin pomocí případu $\alpha_1=0,30$	81
Tabulka 33: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,10$	88
Tabulka 34: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,15$	88
Tabulka 35: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,20$	89
Tabulka 36: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,25$	89
Tabulka 37: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,30$	89
Tabulka 38: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,10$	90
Tabulka 39: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,15$	90
Tabulka 40: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,20$	91
Tabulka 41: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,25$	91
Tabulka 42: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,30$	91
Tabulka 43: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 2; $\alpha_1=0,10$	92
Tabulka 44: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 2; $\alpha_1=0,15$	92
Tabulka 45: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 2; $\alpha_1=0,20$	93
Tabulka 46: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 2; $\alpha_1=0,25$	93
Tabulka 47: Hodnoty parametrů B_1 při růstu trhliny 2; $\alpha_1=0,30$	93
Tabulka 48: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1=0,10$	94
Tabulka 49: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1=0,15$	94
Tabulka 50: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1=0,20$	95
Tabulka 51: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1=0,25$	95
Tabulka 52: Hodnoty parametrů B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1=0,30$	95
Tabulka 53: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,10$	96
Tabulka 54: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,15$	96
Tabulka 55: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,20$	97
Tabulka 56: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,25$	97
Tabulka 57: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 1; $\alpha_2=0,30$	98

Tabulka 58: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,10$	98
Tabulka 59: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,15$	99
Tabulka 60: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,20$	99
Tabulka 61: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,25$	100
Tabulka 62: Hodnoty parametrů B_1, B_2 při růstu trhliny 2; $\alpha_1 = 0,30$	100